

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

Radomír Lasota

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

**Automatizované ověření parametrů výkonových
zesilovačů a DAC převodníků**
**Automated Measurement System for DAC and Power
Amplifier Testing**

2017

Radomír Lasota

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Radomír Lasota

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612T041 Řídicí a informační systémy

Téma:

Automatizované ověření parametrů DAC převodníků a výkonových zesilovačů pro účely generování testovacích signálů
Automated Measurement System for DAC and Power Amplifier Testing

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Při ověřování funkčnosti a parametrů přístrojové měřicí techniky je potřeba zdrojů stimulačních signálů s potřebnými úrovněmi a dynamikou. Na trhu existují speciální kalibrátory, jejichž cena je však vysoká a pro občasné použití se nevyplatí. Náhradou může být vhodný DA převodník a vhodný výkonový zesilovač. Co se dynamiky neperiodických změn signálů týče, je nutné znát chování zvolených komponent.

Cílem práce je návrh metod ověření parametrů stěžejních komponent pro generování výkonových analogových zkušebních signálů. Dalším cílem práce je automatizace nalezených metod prostředky virtuální instrumentace.

Body zadání:

1. Seznámení se s potřebnými typy zkušebních signálů.
2. Vytipování podstatných parametrů komponent, které je potřeba zjistit.
3. Návrh metod ověření parametrů komponent a jejich experimentální ověření.
4. Seznámení se s vývojovými nástroji pro automatizaci měření a testování.
5. Návrh a implementace aplikace pro automatizaci testů.
6. Zhodnocení dosažených výsledků závěrečné práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. 1. vyd. Ilustrace Viktorie Vlachová. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 247 s. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [2] BITTER, Rick, Taqi MOHIUDDIN a Matt NAWROCKI. *LabVIEW advanced programming techniques*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2007, 499 s. ISBN 0-8493-3325-3.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Bilík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017



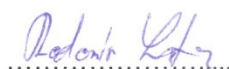
doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.
Dne 28. 4. 2017



Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce **doc. Ing. Petru Bilíkovi, Ph.D.** za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této práce.

Abstrakt

Tato práce má za cíl shromáždit vhodné metody ověření parametrů DAC převodníků a výkonových zesilovačů ke generování zkušebních signálů. Dalším cílem je automatizace nalezených metod prostředky virtuální instrumentace. Co se týče rozdělení HW, testy se budou dělit do dvou kategorií: DAC převodníky a výkonové koncové zesilovače. Celá práce směřuje k ověření parametrů DAC převodníků a výkonových zesilovačů ke generování zkušebních signálů bez nutnosti nákupu drahých, specializovaných komponent.

Výrobci zařízení uvádějí ke svým produktům parametry v manuálech či produktových letácích. Skutečné parametry a chování se však mohou v praxi lišit nebo některé parametry úplně chybí. Součástí práce je ověření skutečných vlastností zesilovačů a DAC převodníků.

Celkový cíl, ke kterému se ověřováním parametrů komponent směřuje, je zcela či částečně nahradit drahé profesionální kalibrátory a zdroje výkonových signálů řetězcem DAC převodník – výkonový zesilovač. Vlastnosti a funkce takového zařízení budou jen zlomkem funkčnosti profesionálních zařízení (například Omicron 256 plus), ale taktéž cena bude nesrovnatelně nižší. Ne každý uživatel navíc vždy využije všech funkcí drahých zařízení.

Klíčová slova

DAC, koncový zesilovač, LabVIEW, testovací metody, ověření parametrů.

Abstract

This thesis aims to collect the appropriate methods for validating parameters of DAC converters and power amplifiers for generating test signals. Another objective is to automate methods by virtual instrumentation devices. Hardware under tests will be divided to two groups: DAC converters and power amplifiers. The whole thesis aims to allow the option of generating test signals without the need to buy specialized expensive components.

Device manufacturers include datasheets to their products. In real conditions, the actual parameters and the behavior may be different or not present at all. The result of this thesis should become a tool to verify some of amplifier parameters. The thesis also includes verification of real parameters of amplifiers.

The higher goal is to replace expensive professional calibrators and signal generators by DAC – power amplifier chain. Features and functions of this device will be only a fraction of the functionality of professional equipment (eg Omicron 256 plus), but also the price will be much lower. In addition, not every user always use all the features of expensive equipment

Key words

DAC, power amplifier, LabVIEW, measurement methods, validating parameters.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	11
Seznam obrázků	12
Seznam tabulek	14
1 Úvod	15
2 Typy testovacích signálů	16
2.1 Harmonický průběh sinus	16
2.2 Obdélníkový signál	17
3 Digitálně analogové převodníky	19
3.1 Klasifikace DAC převodníků	19
3.2 Principy převodu	20
3.3 PWM modulace	20
3.4 Parametry převodníků	21
3.4.1 Statické vlastnosti převodníků	21
3.4.2 Dynamické vlastnosti převodníků	22
4 Výkonové zesilovače	23
5 Specifikace testovaných DAC převodníků	24
5.1 FiiO X3 v2	24
5.2 DragonFly Black v1.5	24
5.3 Axagon HQ	25
5.4 Integrovaná zvuková karta na základní desce PC	26
6 Specifikace použitých DAQ karet s analogovými výstupy výrobce NI	27
6.1 myDAQ	27
6.2 NI PCI 6035E	28
7 Specifikace koncových výkonových zesilovačů	29
7.1 Harman Kardon Signature 1.3	29
7.2 AE Techron 7224	30
7.3 DAP 1500	31
8 Omicron 256 plus	32
9 Měřicí postupy	33
9.1 Česká technická norma ČSN EN 60268-3 ed. 2	34
9.1.1 Jmenovité podmínky	34

10	Postupy měření výkonových zesilovačů	35
10.1	Lineární režim	35
10.1.1	Postup měření lineárního režimu.....	35
10.2	Amplitudová frekvenční charakteristika	36
10.3	Efektivní frekvenční pásmo	37
10.3.1	Postup měření efektivního frekvenčního pásma.....	37
10.4	Fázová frekvenční charakteristika.....	38
10.4.1	Postup měření fázové charakteristiky.....	38
10.5	Odstup signál – šum (SNR).....	39
10.5.1	Postup měření SNR	39
10.6	Rychlost přeběhu.....	40
10.6.1	Postup měření rychlosti přeběhu	41
10.7	Činitel harmonického zkreslení THD a THD+N	41
10.7.1	Ruční postup měření THD	42
11	Postupy měření DAC převodníků a DAQ karet NI.....	44
11.1	Měření vlastností výstupního signálu v závislosti na výstupní úrovni.....	44
11.2	Měření vlastností DAC převodníků při různých frekvencích signálu.....	44
11.3	Rychlost přeběhu.....	45
11.4	Schopnost generovat DC signál	45
11.5	Netestované parametry	45
11.6	Postupy měření analogových výstupů karet NI.....	45
12	Použité DAQ karty s analogovými vstupy výrobce NI.....	47
12.1	Karta NI PCI 4472.....	47
12.2	Karta NI 9223	47
12.3	Osciloskopická karta USB 5133	48
13	Popis programů pro měření výkonových zesilovačů	50
13.1	Obecné schéma zapojení pro všechny DAQ karty NI.....	50
13.2	Popis algoritmu pro měření lineárního režimu.....	51
13.3	Popis programu pro měření SNR	54
13.4	Popis algoritmu pro měření rychlosti přeběhu	56
13.5	Popis algoritmu měření amplitudové a fázové charakteristiky, THD a THD+N	58
13.6	Popis algoritmu pro sledování reakce na skokovou změnu amplitudy	61
14	Popis programů pro měření DAC převodníků a výstupních karet NI	64

14.1	Prvotní nastavení DAC převodníků	64
14.1.1	Nastavení převodníku DragonFly ve Windows	64
14.1.2	Nastavení FiiO X3 2nd.....	66
14.1.3	Nastavení ostatních převodníků	66
14.2	Přístup LabVIEW k DAC převodníkům	67
14.3	Popis generování signálu na DAC převodníku	68
14.4	Popis programu pro měření výstupu v závislosti na výstupní úrovni	70
14.4.1	Měření DAC převodníků.....	70
14.4.2	Měření karet NI s analogovým výstupem	70
14.5	Popis programu pro měření výstupního napětí a zkreslení	71
14.6	Popis programu pro měření rychlosti přeběhu	71
14.7	Popis programu pro měření SNR u DAC převodníků.....	71
14.8	Měření DC signálu	73
15	Naměřené výsledky	74
15.1	Výsledky pro výkonové zesilovače.....	74
15.1.1	Porovnání koncových stupňů mezi sebou	74
15.1.2	Porovnání koncových stupňů s katalogovými hodnotami.....	75
15.1.3	Naměřené výsledky pro Harman Kardon Signature 1.3.....	76
15.1.1	Naměřené výsledky pro AE Techron 7224	78
15.1.2	Naměřené výsledky pro DAP 1500.....	79
15.2	Výsledky pro DAC převodníky a DAQ karty NI.....	81
15.2.1	Porovnání DAC převodníků mezi sebou.....	81
15.2.1	Porovnání DAC převodníků a karet NI s katalogovými údaji	82
15.2.2	Naměřené výsledky pro DAC převodníky a karty NI s AO výstupy	83
16	Možnosti generování výkonových zkušebních signálů.....	86
17	Závěr	88

Seznam použité literatury

Seznam příloh

Seznam použitých symbolů a zkratek

AC	Střídavý proud (Alternating Current)
AI	Analogový vstup (Analog Input)
AO	Analogový výstup (Analog Output)
DAC	Digitálně analogový převodník (Digital to Analog Converter)
DC	Stejnoseměrný proud (Direct Current)
e_f , RMS	Efektivní hodnota napětí
FFT	Rychlá Fourieriho transformace (Fast Fourier transform)
LabVIEW	Programovací prostředí společnosti National Instruments
LSB	Nejméně významný bit (Least Significant Bit)
NI	National Instruments
OZ	Operační zesilovač
PWM	Pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
SNR	Odstup signál – šum (Signal To Noise Ratio)
THD	Harmonické zkreslení (Total Harmonic Distortion)
THD+N	Harmonické zkreslení plus šum (Total Harmonic Distortion Plus Noise)
VISA	Virtual Instrument Software Architecture
V _{pp}	Napětí špička – špička (Voltage peak to peak)

Seznam obrázků

Obr. 1 – Průběh dvou period signálu sinus x	17
Obr. 2 – Průběh dvou period obdélníkového signálu se střídou 25 %	18
Obr. 3 – Blokové schéma digitálně analogového převodníku	19
Obr. 4 – PWM modulace [6]	20
Obr. 5 – Ideální převodní charakteristika 3 - bitového převodníku	21
Obr. 6 – FiiO X3 v2	24
Obr. 7 – DragonFly Black 1.5	25
Obr. 8 – Axagon HQ	25
Obr. 9 – myDAQ	27
Obr. 10 – DAQ karta NI PCI 6035E	28
Obr. 11 – Harman Kardon Signature 1.3	29
Obr. 12 – AE Techron 7224	30
Obr. 13 – DAP 1500	31
Obr. 14 – Omicron 256 plus	32
Obr. 15 – Schéma zapojení pro měření lineárního režimu	36
Obr. 16 – Schéma zapojení pro měření amplitudové charakteristiky	37
Obr. 17 – Schéma zapojení pro měření fázové charakteristiky	38
Obr. 18 – Schéma zapojení pro měření SNR	40
Obr. 19 – Ukázka grafu pro výpočet doby náběhu v LabVIEW	41
Obr. 20 – Schéma zapojení pro měření THD	43
Obr. 21 – DAQ karta NI PCI 4472	47
Obr. 22 – DAQ karta NI 9223 zapojená v CompactDAQ 9188	48
Obr. 23 – DAQ karta NI USB 5133	49
Obr. 24 – Schéma zapojení DAQ karet pro měření výkonových zesilovačů	50
Obr. 25 – Signálový generátor Agilent 33500B	51
Obr. 26 – Zjednodušené blokové schéma pro měření lineárního režimu výkonových zesilovačů	51
Obr. 27 – Čelní panel aplikace pro měření lineárního režimu	52
Obr. 28 – Zajištění celistvého počtu period signálu pro první kanál	53
Obr. 29 – Zjednodušené blokové schéma pro měření SNR výkonových zesilovačů	54
Obr. 30 – Čelní panel aplikace pro měření SNR	55
Obr. 31 – Zjednodušené blokové schéma pro měření rychlosti přeběhu výkonových zesilovačů	56
Obr. 32 – Čelní panel aplikace pro měření rychlosti přeběhu	56
Obr. 33 – Stanovení rychlosti přeběhu	58
Obr. 34 – Zjednodušené blokové schéma pro měření amplitudové a fázové char. a zkrslení výkonových zesilovačů	59
Obr. 35 – Čelní panel aplikace pro měření měření amplitudové char., fázové char., THD a THD+N	60
Obr. 36 – Nastavení časového okna pro měření	61
Obr. 37 – Zjednodušené blokové schéma programu pro sledování reakce na skokovou změnu amplitudy	62
Obr. 38 – Čelní panel aplikace pro sledování reakce na skokovou změnu amplitudy	62

Obr. 39 – Výběr DAC převodníku	64
Obr. 40 – Nastavení vzorkovací frekvence DAC převodníku	65
Obr. 41 – Generování obdélníkového signálu při špatně zvolené vzorkovací frekvenci	66
Obr. 42 – Funkce pro práci s DAC převodníky v LabVIEW	67
Obr. 43 – Zjednodušené blokové schéma generátoru zvuku na DAC	68
Obr. 44 – Ukázka vzdáleně volaného ovládání DAC	69
Obr. 45 – Čelní panel aplikace měření výstupu v závislosti na výstupní úrovni	70
Obr. 46 – Čelní panel aplikace měření SNR	72
Obr. 47 – Čelní panel aplikace pro sledování reakce na DC signál DAC převodníku	73
Obr. 48 – Modulová charakteristika Harman Kardon 1.3	76
Obr. 49 – Fázová charakteristika Harman Kardon 1.3	77
Obr. 50 – Průběh THD a THD+N - Harman Kardon 1.3	77
Obr. 51 – Modulová charakteristika AE Techron 7224	78
Obr. 52 – Fázová charakteristika AE Techron 7224	78
Obr. 53 – Průběh THD a THD+N - AE Techron 7224	79
Obr. 54 – Modulová charakteristika DAP 1500	79
Obr. 55 – Fázová charakteristika DAP 1500	80
Obr. 56 – Průběh THD a THD+N - DAP 1500	80
Obr. 57 – Srovnání amplitudových charakteristik DAC převodníků a karet NI s AO výstupy	83
Obr. 58 – Průběh výstupního napětí na % úrovni - FiiO X3	83
Obr. 59 – Průběh zkreslení na % úrovni - FiiO X3	84
Obr. 60 – Blokové schéma řetězce pro generování výkonových zkušebních signálů	86

Seznam tabulek

Tab. 1 – Srovnání klíčových vlastností uvedených DAC převodníků	26
Tab. 2 – Parametry výkonového zesilovače Harman/kardon Signature 1.3.....	29
Tab. 3 – Parametry výkonového zesilovače AE Techron 7224	30
Tab. 4 – Parametry výkonového zesilovače DAP 1500.....	31
Tab. 5 – Parametry víceúčelového kalibrátoru Omicron 256 plus	32
Tab. 6 – Výsledky výkonových zesilovačů pro srovnání.....	74
Tab. 7 – Porovnání koncových stupňů s katalogovými hodnotami.....	75
Tab. 8 – Výsledky DAC převodníků a AO karet pro srovnání	81

1 Úvod

Cílem práce je ověření parametrů DAC převodníků (dále jen DAC) a výkonových zesilovačů a následné vyhodnocení výsledků. Z naměřených výsledků pak bude možné rozhodnout, které zesilovače a za jakých podmínek je v kombinaci s DAC převodníkem možné využít pro generování výkonových zkušebních signálů, kterými bude testována měřicí technika pro elektroenergetiku (elektroměr, analyzátor kvality napětí, jednotka vyhodnocení synchronních fázorů PMU). Jedná se tedy o ověření vhodnosti použití DAC převodníků a výkonových zesilovačů, které jsou primárně určeny pro oblast reprodukce hudby v oblasti pro tyto komponenty netypické.

K automatizovanému ověření parametrů byly vytvořeny testovací aplikace v prostředí LabVIEW, jenž využívají k testům komponent především měřicí karty společnosti National Instruments. Jednotlivé testy se liší podle toho, zdali je testován DAC převodník nebo výkonový koncový stupeň. Měření parametrů je nutné nejen z důvodů ověření pravdivosti údajů, jež udává výrobce, ale i proto, že ne všechny potřebné informace výrobci uvádějí.

Většina měření vychází z postupů, jež jsou uvedeny v České technické normě ČSN EN 60268-3. Tato norma obsahuje popis velkého množství parametrů, z nich jak sama udává, nejsou všechny parametry povinné. Některé z parametrů proto nebyly podle této normy měřeny, neboť pro budoucí využití zesilovačů a DAC převodníků nejsou podstatné. Norma sama uvádí, že postupy měření patří mezi základní, a nejsou příliš vhodné pro automatizovaná měření. Z toho důvodu jsou některé z testů měřeny jinak, ekvivalentními metodami. A nakonec, tato norma je určena především pro audio vybavení, nezabývá se tudíž všemi parametry, které bude třeba měřit. Pro vlastnosti, jež tato norma nepopisuje, byly využity jiné zdroje informací, jež jsou v práci uvedeny.

2 Typy testovacích signálů

Při testování různých veličin, ať už v elektrotechnické praxi nebo v oblasti audio je třeba budit testované zařízení, v tomto případě nejčastěji nějaký druh zesilovače potřebným signálem.

Základním testovacím průběhem je periodický harmonický signál (sinus), obvykle bez DC složky. Zvláště v oblasti audia je stěžejním průběhem sinus o frekvenci 1 kHz bez stejnosměrné složky. Při tomto průběhu se měří většina veličin a udává se pro něj např. maximální výkon zesilovače, maximální výstupní napětí, harmonické zkreslení THD a harmonické zkreslení se šumem THD+N.

Dalším typem signálu je obdélníkový signál, u kterého se určuje kromě amplitudy a frekvence i střída, což je poměr časů, kdy je obdélníkový signál v jednotlivých binárních úrovních. Při testování zesilovačů je tento průběh používán k měření rychlosti přeběhu.

Pro účely ozvučení sálů je používán i bílý a růžový šum. Bílý šum je definován jako signál s konstantní spektrální hustotou na všech kmitočtech. Jelikož by takový signál musel mít nekonečnou energii a není realizovatelný, zavádí se pojem pásmový bílý šum. Jedná se o bílý šum po průchodu pásmovým filtrem. [1]

Úpravou bílého šumu získáme růžový šum. Jiné označení říká, že se jedná o kmitající šum nebo $1/f$ šum. Frekvenční hustota takového signálu je úměrná převrácené hodnotě frekvence. Jinak řečeno, tento signál má stejnou energii ve všech oktávách. Stejně jako u bílého šumu jej nelze prakticky generovat v nekonečně širokém pásmu. [2]

2.1 Harmonický průběh sinus

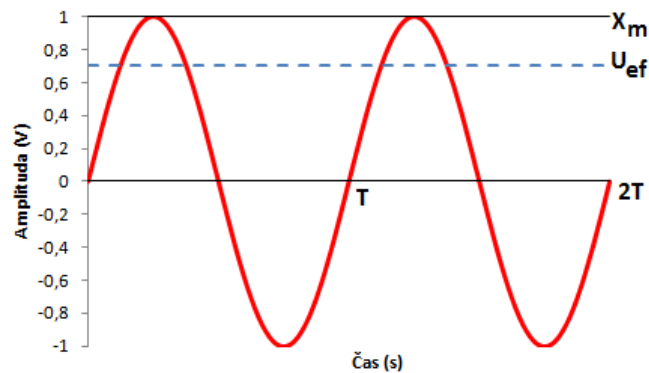
Sinusový signál se řadí mezi periodické harmonické signály. Nejznámější technické využití je bezpochyby v elektrické síti, kde se ideálně vyskytuje s efektivní hodnotou 230 V a frekvencí 50 Hz.

Obeční popis sinusového signálu:

$$x(t) = X_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

kde X_m je amplituda signálu (V), ω je úhlová rychlost ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$), t je čas (s) a φ značí počáteční fázi (rad).

Sinusový signál může být rovněž posunut o stejnosměrnou složku do kladných nebo záporných hodnot.



Obr. 1 – Průběh dvou period signálu sinus x

2.2 Obdélníkový signál

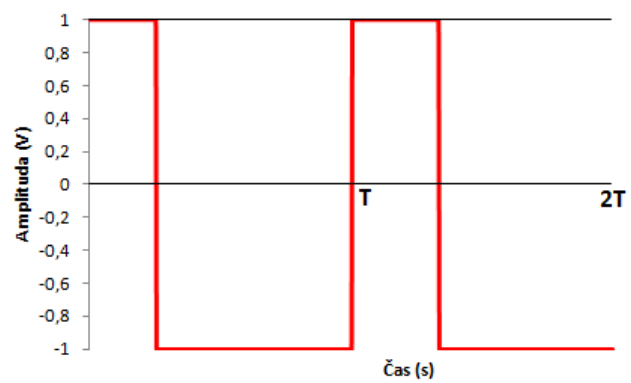
Obdélníkový signál je periodický, nesinusový průběh, v čase se střídají dvě hodnoty signálu: maximální a minimální. Poměr mezi maximální hodnotou signálu a periodou se označuje jako střída, a uvádí se v procentech. [3]

Obecný popis obdélníkového signálu

$$f(x) = \max, x \in \left(0; \frac{T}{2}\right), \quad (2)$$

$$f(x) = \min, x \in \left(\frac{T}{2}; T\right), \quad (3)$$

Základní tvar obdélníkového signálu je bez DC offsetu a se střídou 50 %, což znamená, že poměr maximální hodnoty k minimální je stejný. Na následujícím obrázku je ukázka obdélníkového signálu se střídou 25 %, to znamená, že $\frac{1}{4}$ času je signál v maximu a $\frac{3}{4}$ času je v minimu. Signál nemusí být nutně bipolární, minimální hodnota bývá často nula.

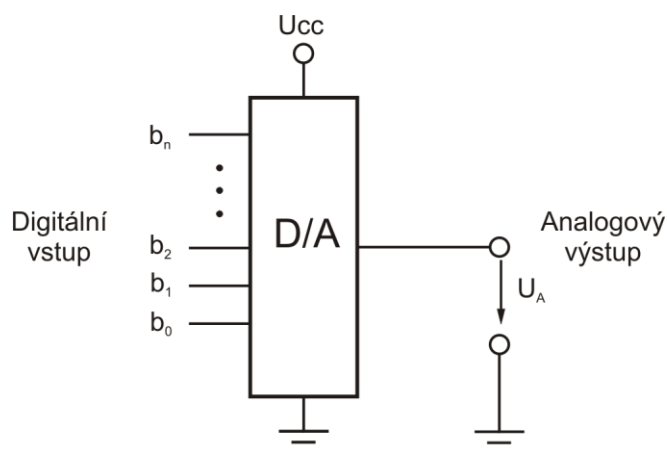


Obr. 2 – Průběh dvou period obdélníkového signálu se střídou 25 %

3 Digitálně analogové převodníky

Jedná se o zařízení určené k převádění digitální, neboli číslicové hodnoty signálu na analogovou. Digitálně analogové převodníky mají široké spektrum využití. Jejich opakem jsou pak analogově digitální převodníky, jež plní opačnou funkci, a to převod z analogové, neboli spojité hodnoty na číslicovou.

Známější oblastí, kde se DAC uplatňují asi nejvíce je bezpochyby oblast audio. DAC převodníky nalezneme v každém CD nebo MP3 přehrávači, ve zvukových kartách v PC i v notebookech. Další oblastí využití, hlavně z elektroniky jsou např. software defined radio a generátory signálu. [4]



Obr. 3 – Blokové schéma digitálně analogového převodníku

3.1 Klasifikace DAC převodníků

Dle druhu výstupního signálu rozlišujeme unipolární a bipolární převodníky, a dále pak převodníky s proudovým a napěťovým výstupem a dvoukvadrantové a čtyřkvadrantové převodníky. Dále se převodníky dělí na paralelní a sériové.

Unipolární převodníky mají výstupní signál pouze jedné polarit. Výstup bipolárních převodníků může nabývat obou polarit. Většinou bývají napěťově symetrické okolo nuly. Převodníky s proudovým výstupem jsou principiálně číslicově řízené zdroje proudu. V případě potřeby se pak pomocí převodníku proud-napětí převede signál na napěťový. Převodníky s napěťovým výstupem jsou pak číslicově řízené zdroje napětí.

3.2 Principy převodu

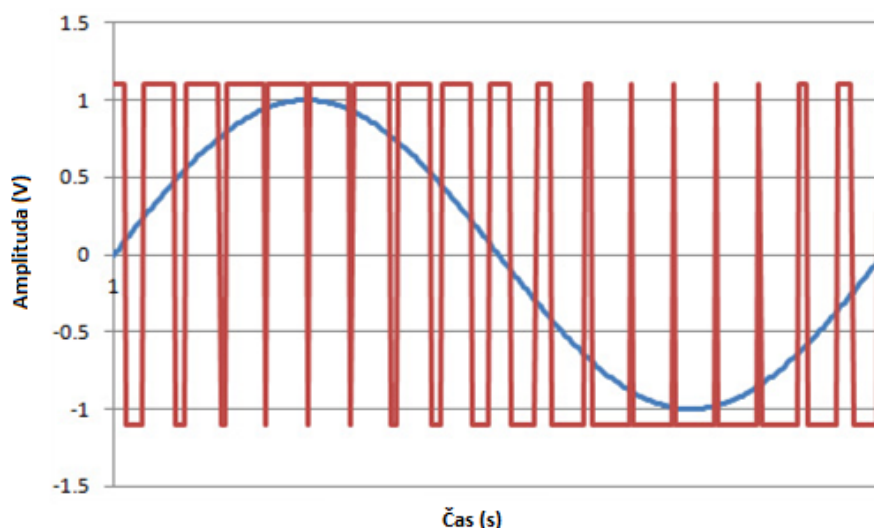
Fyzikálních principů převodu je několik. Mezi ty základní patří např. převodníky s rezistorovými sítěmi:

- Váhová rezistorová síť – sčítání váhových proudů na vstupu invertujícího zesilovače,
- Žebříčková rezistorová síť R-2R – obvod tvoří váhově odstupňované rezistory,
- Kombinovaná síť – využívá obou předchozích variant.

Dále pak převodníky se spínanými proudovými zdroji, DAC převodníky se spínanými proudovými zdroji, násobící převodníky anebo převodníky se spínanými kondenzátory.

3.3 PWM modulace

Impulsní šířková modulace (anglicky Pulse width modulation) se taktéž využívá pro převod číslicového signálu na analogový. Digitální signál, reprezentován posloupností digitálních hodnot je postupně převáděn na impulsní signál, u kterého se mění šířka pulsů a mezi impulsy je nulové napětí. Analogová hodnota je pak úměrná šířce generovaného pulsu. Perioda pulsu je konstantní. Technické provedení je realizováno tvarovačem PWM signálu a vhodným dolnoproustným filtrem. [5]



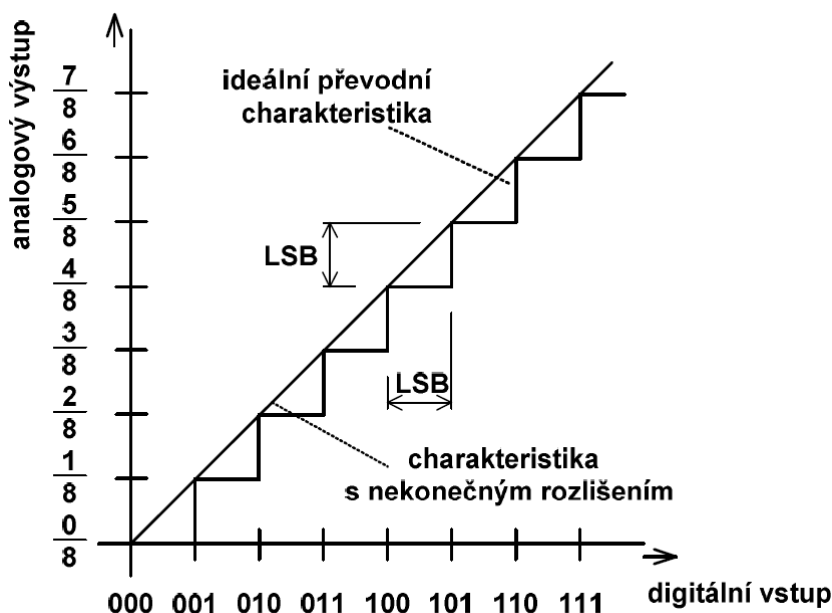
Obr. 4 – PWM modulace [6]

3.4 Parametry převodníků

Vlastnosti digitálně analogových převodníků můžeme rozdělit na dvě základní kategorie: statické a dynamické. Statické parametry převodníků určují charakter převodníku v situacích, kdy nedochází k rychlým změnám. Dynamické vlastnosti oproti tomu získáme z kmitočtového spektra převodníku.

3.4.1 Statické vlastnosti převodníků

Převodní charakteristika, jakožto závislost výstupu na řídicí veličině, nám může dopomoci k určení hned několika parametrů. Proložení reálné a ideální převodní charakteristiky převodníku je možné stanovit chybu nuly, chybu maxima, chybu monotónnosti a chybu linearitu. [7]



Obr. 5 – Ideální převodní charakteristika 3 - bitového převodníku

Rozsah převodníku je definován jako rozdíl výstupní analogové veličiny při nejvyšší a nejnižší kvantovací hladině. Rozlišovací schopnost – kvantizační krok je dán počtem diskretních úrovní výstupního signálu. Určí se jako:

$$Q = \frac{1}{2^n - 1} \quad (4)$$

S tříbitovým převodníkem můžeme na výstupu dosáhnout 8 analogových hodnot, s osmibitovým převodníkem již 256 a např. s 16 bitovým převodníkem dosáhneme 65536 hodnot. Zavádí se pojem LSB - Least Significant Bit, což je nejméně významný bit ve výstupním slovu. Přesnost výstupního napětí je definována jako největší odchylka mezi ideální a reálnou převodní charakteristikou. Může se udávat i v poměru k maximálnímu rozsahu DAC převodníku. Kvantovací chyba je způsobena konečným počtem diskrétních úrovní na výstupu převodníku a běžně dosahuje hodnoty $\pm 1/2$ LSB.

3.4.2 Dynamické vlastnosti převodníků

Dynamické parametry převodníku určují, jak se převodník chová při rychlých změnách. Mluvíme pak o kmitočtovém spektru převodníku. Odstup signál - šum (SNR) udává poměr užitečného signálu k množství šumu, většinou se udává v decibelech. Míra SNR se odvíjí od počtu kvantovacích úrovní (rozlišení) a projeví se na něm i zkreslení, glitch, šum a čas ustálení.

Harmonické zkreslení (THD) se měří tak, že se zesilovač budí sinusovým signálem (v digitální formě na straně vstupu). Jedná se o zkreslení výstupního signálu vyššími harmonickými základní frekvence signálu. Glitch je pojem, jež označuje přechodovou špičku. Bývá mnohonásobně vyšší, než je běžná hodnota LSB. Tato situace může nastat např. situaci, kdy se uvnitř převodníku přepíná více přepínačů najednou, např. 011→100. Doba převodu je maximální čas, který potřebuje převodník k ustálení výstupní analogové veličiny. Pohybuje se v řádu stovek nanosekund až jednotek mikrosekund.

4 Výkonové zesilovače

Výkonové zesilovače jsou zařízení, která zesilují amplitudu, proud nebo obojí - vstupního signálu a jsou schopna dodat jmenovitý výkon do připojené zátěže. Samotné zesílení těchto dvojbranů bývá nižší, než u předzesilovačů. Amplituda vstupního signálu bývá okolo desítek voltů. [8]

Mezi základní parametry koncových stupňů patří: výstupní výkon, výstupní amplituda, harmonické zkreslení THD, harmonické zkreslení plus šum THD+N, odstup signálu od šumu SNR, vstupní a výstupní impedance a dále frekvenční a fázové charakteristiky.

Tabulkové hodnoty udávané výrobcem bývají velmi často vztaženy k hodnotě vstupního signálu, kterou je pro většinu měření sinusový průběh o frekvenci 1 kHz. Tato frekvence a typ signálu se volí přednostně, aby bylo možné porovnat zesilovače různých výrobců mezi sebou. Je nutné zdůraznit, že většina parametrů není konstantní pro různé vstupní frekvence signálu. Pro přesnější popis chování zesilovače nestačí jedna hodnota pro frekvenci 1 kHz, ale je dobré znát celou frekvenční charakteristiku.

5 Specifikace testovaných DAC převodníků

Převodníků k proměření bylo vybráno několik a byly vybrány v různých cenových kategoriích s různými vlastnostmi a od různých výrobců. To proto, aby vynikly jejich případné rozdíly. U dražších převodníků jsou očekávány lepší výsledky například v oblasti kmitočtů blížících se, nebo i převyšujících 20 kHz.

5.1 FiiO X3 v2

Tento bateriový přehrávač a DAC se řadí mezi kvalitní přehrávače mnoha formátů s barevným displejem a hliníkovým šasi. Po připojení do PC pomocí mikroUSB kabelu je možné jej využívat jako externí DAC. Zde je nutno podotknout, že i když výrobce slibuje kvalitu 192 kHz a 24 bitů, v režimu DAC disponuje tento přístroj bitovou hloubkou pouze 16 bitů. [9]



Obr. 6 – FiiO X3 v2

5.2 DragonFly Black v1.5

Druhým DAC převodníkem, jež rozměry a tvarem připomíná spíše flash disk je produkt DragonFly Black od společnosti Audioquest. Výstupním portem je 3,5 mm stereo Jack, výstupní zvuk je generován s maximální vzorkovací frekvencí 96 kHz a hloubkou 24 bit. Vzorkovací frekvence je indikována ve čtyřech barvách na převodníku, dle nastavené vzorkovací frekvence. [10] [11]



Obr. 7 – DragonFly Black 1.5

5.3 Axagon HQ

Tato externí zvuková karta se cenou řadí mezi levnější produkty, ale zato je velice všestranná. Převodník disponuje dvěma stereo výstupy jack 3,5 mm, digitálním SPDIF výstupem, a má i mikrofonní vstup, potenciometrický regulátor hlasitosti a jednoduchý ekvalizér. Výrobce uvádí, že je schopen pracovat až při 96 kHz a 24 bitové hloubce. [12][13]



Obr. 8 – Axagon HQ

5.4 Integrovaná zvuková karta na základní desce PC

Pro účely srovnání byl využit i DAC převodník, který je již integrován v základní desce počítače, na kterém probíhá měření. Přesných specifikací je k těmto převodníkům velice málo, jelikož v PC je multimediální základní deska FM2A88X Extreme4+ a výrobce ASRock bližší specifikace k DAC převodníkům neuvádí.

Následující tabulka shrnuje parametry DAC převodníků, jak je uvádí výrobci.

Tab. 1 – Srovnání klíčových vlastností uvedených DAC převodníků

Parametr	FiiO X3 v2	DragonFly 1.5	Axagon HQ	PC integr. karta
Výstupní napětí	1,24 V ef.	1,2 V ef.	1,2 V ef.	<i>Výrobce neuvádí</i>
Výstupní rozlišení	16 bit	24 bit	24 bit	<i>Výrobce neuvádí</i>
Vzorkovací frekvence	192 kHz	96 kHz	96 kHz	48 kHz
Frekvenční rozsah	20 Hz – 20 kHz	20 Hz – 20 kHz	20 Hz – 20 kHz	20 Hz – 20 kHz
Regulace hlasitosti	0-100 % (SW)	0-100 % (SW)	0-100 % (SW), potenciometr	0-100 % (SW)
THD + N	<0,003 %	<i>Výrobce neuvádí</i>	<0.006 %	<i>Výrobce neuvádí</i>
SNR	>113 dB*	<i>Výrobce neuvádí</i>	≥ 95 dB	<i>Výrobce neuvádí</i>
Přibližná cena	5000 Kč	2800 Kč	600 Kč	<i>Součástí MB</i>

*Pozn.: Udáváno pro váženou charakteristiku A

6 Specifikace použitých DAQ karet s analogovými výstupy výrobce NI

Byly proměřeny i dvě digitální DAQ karty s analogovými výstupy výrobce National Instruments. Měření DAQ karet je podobné, jako měření DAC převodníků, s tím rozdílem, že tyto karty jsou přímo určeny ke generování signálů a jsou schopny generovat i stejnosměrný signál. Tato vlastnost se u audio DAC převodníků neočekává.

6.1 myDAQ

Toto zařízení je dle výrobce určeno primárně pro výukové účely a komunikuje s PC pomocí USB. MyDAQ disponuje dvěma analogovými vstupy s rozlišením 16 bit a 200 kS/s, jeden 32 bitový čítač, digitální multimetr, referenční zdroje napětí a konečně dva analogové výstupy s rozlišením 16 bit a vzorkovací rychlostí 200 kS/s s maximálním výstupním napětím ± 10 V a ± 2 V.

Generování analogových signálů je možné buď na výstupy na svorkovnici (AO0 a AO1), nebo na stereo výstup Jack 3,5 mm. Pro měření jsou využity analogové výstupy, neboť mají vyšší napěťový výstup ± 10 V a DC vazbu. Pro stereo (Audio) výstup je výstupní rozsah pouze ± 2 V a AC vazba.



Obr. 9 – myDAQ

Chyba pro ± 10 V = $\pm 19,6$ mV, maximálně 42,8 mV

Chyba pro ± 2 V = $\pm 5,4$ mV, maximálně 8,8 mV

Rychlost přeběhu pro obdélníkový signál je rovna 4 V/us.

6.2 NI PCI 6035E

Tato multifunkční karta disponuje kromě 16 analogovými vstupy i jedním digitálním portem a dvěma čítači. Pro účely generování analogového signálu budou využity dva analogové výstupy. Právě ty budou použity ke generování signálů. Rozlišení těchto analogových výstupů je 12 bitů. Maximální vzorkovací frekvence je dle datasheetu 10 kHz a je schopna generovat i stejnosměrné signály. Výstupní napětí je ± 10 V.

Přesnost karty pro analogové výstupy:

Chyba = $\pm 0,18$ % z generované hodnoty a $\pm 5,93$ μ V. Čas ustálení pro maximální skok je 10 μ s a rychlost přeběhu je rovna 10 V/ μ s. Šum karty je udáván 200 μ V.



Obr. 10 – DAQ karta NI PCI 6035E

Maximální generovaná frekvence signálu zaleží na počtu současně využívaných kanálů. Pokud bude využíván pouze jeden analogový kanál, může být maximální generovaná frekvence 10 kHz. Pokud budou současně využívány oba kanály, může být rychlost na jednom z kanálů pouze 1 kHz. Tato vlastnost je dána skutečností, že karta NI 6035E je staršího data výroby a pro generování analogového výstupu využívá sdílené prostředky.

7 Specifikace koncových výkonových zesilovačů

Druhou velice důležitou částí řetězce, který má generovat výkonové testovací signály je výkonový zesilovač. Toto zařízení se postará o dostatečné zesílení signálu na výstupu a dodá jej s potřebnou dynamikou a s potřebným proudem.

Audio zesilovače nejsou explicitně určeny pro generování testovacích signálů, ale měly by být použitelné. Jak moc vhodné jsou, je možné prokázat měřením parametrů.

7.1 Harman Kardon Signature 1.3

Tento kvalitní koncový stupeň, jež disponuje třemi kanály a výkonem 150 W na každý kanál. Frekvenční rozsah je uváděn v rozmezí 1 Hz, což je téměř stejnosměrná složka, až do frekvence 170 kHz. [14]



Obr. 11 – Harman Kardon Signature 1.3

Tab. 2 – Parametry výkonového zesilovače Harman/kardon Signature 1.3

Parametr	Hodnota	Poznámka
Výkon	3x150 W do 4 ohmů	
	3x100 W do 8 ohmů	
Maximální napětí	<i>Výrobce neuvádí</i>	

Frekvenční odezva	1 Hz – 170 kHz	
Šířka pásma	5 Hz – 160 kHz	
THD	< 0,08 %	V rozsahu 20 Hz – 20 kHz
Odstup signál - šum	115 dB	
Přeslechy mezi kanály	< 87 dB	Při maximálním výkonu
Intermodulační zkreslení TIM	< 0,01 %	
Počet kanálů	3	
Přibližná cena	70.000 Kč	Vyráběn v letech 1998 - 2000

7.2 AE Techron 7224

Jedná se o průmyslový zesilovač, schopen pracovat v rozsahu DC až 300 kHz v režimu řízený proudem nebo napětím. V krátkých impulsech dokáže dodat napětí až 150 V anebo proud až 50 A a trvalý výstupní výkon až 1 kW do zátěže 8 ohm. Je možné jej umístit do racku o výšce 2U. Zesilovač má jeden kanál. [15]



Obr. 12 – AE Techron 7224

Tab. 3 – Parametry výkonového zesilovače AE Techron 7224

Parametr	Hodnota	Poznámka
Maximální výkon	1000 W do zátěže 8 ohm	Při napětí 96 Vrms a 1 h provozu
	568 W, 49 Vrms, 12 A	Při provozu 1 h
Maximální napětí	±140 Vpp do 8 ohm zátěže	V rozsahu DC – 60 kHz
	±30 Vpp do 8 ohm zátěže	V rozsahu DC – 300 kHz
Šířka pásma	DC – 300 kHz	
Vstupní citlivost	± 10 V	
Fázový posun	± 5°	V rozsahu 10 Hz – 10 kHz
THD	<0,1 %	V rozsahu DC – 30 kHz
Odstup signál - šum	100 dB	V rozsahu 10 Hz – 300 kHz
Rychlost přeběhu	75 V/us	
Počet kanálů	1	
Přibližná cena	100.000 Kč	

7.3 DAP 1500

Koncový stupeň společnosti DEXON řady DAP. Tento audio zesilovač je charakteristický dobrým poměrem cena/výkon. Využívá se v ozvučovací technice a je mechanicky poměrně robustní. Zesilovač obsahuje limiter (omezení výstupního signálu při přebuzení) a filtr nízkých frekvencí (filtr typu horní propust, omezující frekvence pod 30 Hz) Obě funkce je možné zapnout nebo vypnout. Zařízení má dva kanály, ale je možné jej zapojit do můstkového zapojení. [16]



Obr. 13 – DAP 1500

Tab. 4 – Parametry výkonového zesilovače DAP 1500

Parametr	Hodnota	Poznámka
Výkon	2x800 W	do 4 ohmů
	2x600 W	do 8 ohmů
Maximální napětí	<i>Výrobce neuvádí</i>	
Šířka pásma	20 Hz – 20 kHz	
THD	< 0,05 %	V rozsahu 20 Hz – 20 kHz
Odstup signál - šum	> 100dB	
Přeslechy mezi kanály	< 87dB	Při maximálním výkonu
Intermodulační zkreslení	< 0.015 %	Signál 60 Hz, 7 kHz
Vstupní citlivost	± 0.707 V sym./ 1.55 V nesym.	Konektory Jack 6,3 mm a XLR
Počet kanálů	2	
Přibližná cena	10.000 Kč	

8 Omicron 256 plus

Toto profesionální víceúčelové zařízení se používá k simulování 3 fázových soustav a ke kalibracím různých zařízení, např. měřidel kvality sítě takzvaných PQA. Jelikož má oddělené napěťové a proudové výstupní svorky, je možné na něm generovat signály, které se pro wattmetry, elektroměry atd. tváří jako průběhy s velkým výkonem, ale spotřeba energie tohoto zařízení je minimální. Přístroj se ovládá pomocí několika aplikací na počítači a spektrum jeho možností je skutečně velké. Jeho nevýhodou je však vysoká cena, která se pohybuje v řádech milionů korun. [17]

Omicron 256 plus je zde uveden jako etalon, jehož parametrů při generování napěťových a proudových signálů se pomocí DAC převodníků a výkonových zesilovačů je vhodné se přiblížit.

Jedním z cílů této diplomové práce je zjistit parametry řetězce digitálně analogového převodníku a výkonového zesilovače, který by měl alespoň z části pokrýt schopnosti a možnosti tohoto drahého zařízení. Je samozřejmé, že zařízení, postavené za zlomek ceny profesionálního Omicronu bude mít jen zlomek schopností, ale ne každý uživatel musí nutně využít plné funkcionality tohoto kalibrátoru.



Obr. 14 – Omicron 256 plus

Tab. 5 – Parametry víceúčelového kalibrátoru Omicron 256 plus

Vlastnost	Hodnota	Poznámky
Napěťový výstup	DC 0 – 264 V	
	4x300 V nebo 1x600 V	Chyba < 0.015 % z nastavené hodnoty + 0.005 % rozsahu
Proudový výstup	6x12,5 A nebo 3x25 A nebo 1x75A	Chyba < 0.015 % z nastavené hodnoty + 0.005 % rozsahu
Kombinovaný výstup	3x300 V a 3x12,5 A	
Analogové výstupy	6x ± 10 V _{pp}	
Přibližná cena	1.000.000 Kč	

9 Měřicí postupy

Součástí práce je vytvoření automatizovaného testeru DAC převodníků a výkonových zesilovačů v LabVIEW. Měření parametrů se dělí do dvou kategorií: měření DAC převodníků a měření výkonových zesilovačů. Není možné měřit všechny parametry obou skupin, neboť v některých případech je vyžadováno například měření napětí na vstupu zesilovače a u DAC převodníků už z principu měření tohoto parametru nedává smysl.

Postupy v České technické normě ČSN EN 60268-3 ed. 2 (dále jen norma, specifikováno v Kap. 9.1) se staly podkladem pro velkou část měření v této diplomové práci. Je však nutno podotknout, že všechna měření nejsou realizována přesně podle normy, ale bylo využito alternativních metod. Důvodů je několik: prvním důvodem je technická náročnost některých postupů, uváděných v normě. Ne všechna vybavení, která jsou nutná pro měření přesně dle normy, jsou dostupná na mém pracovišti na VŠB-TUO.

Příkladem může být měření harmonického zkreslení THD, kdy norma vyžaduje zapojení laditelného, vysoce selektivního filtru typu pásmová zádrž pro odfiltrování základní harmonické a využití voltmetrů. Namísto toho bude měření realizováno výpočtem frekvenčního spektra pomocí funkce pro výpočet FFT v LabVIEW z navzorkovaného průběhu a následné určení poměru amplitud základní frekvence a harmonických složek. Měření napětí taktéž nebude realizováno voltmetry, ale analogovými kanály DAQ karet NI (NI PCI 4472, NI 9223, NI USB 5133).

Druhým důvodem, proč nebudou všechna měření realizována striktně podle norem je skutečnost, že jak je i přímo v této normě uvedeno, velké množství měřících postupů nelze automatizovat. Tato skutečnost jde proti požadavkům této práce, proto bude v takových případech využito jiných vhodných metod.

V popisech měření a elektrotechnických schématech budou uvedeny příklady pro ruční měření za využití klasických měřících přístrojů, jako voltmetry a osciloskopy. V automatizovaném testeru bude místo těchto přístrojů využito prostředků virtuální instrumentace: různé DAQ karty.

Měření DAC převodníků principiálně vychází z měření výkonových zesilovačů s tím, že jsou měřeny pouze parametry, které má smysl pro účely této práce měřit, a tím je: výstupní napětí, frekvenční pásmo, míra zkreslení THD a THD+N, rychlost přeběhu a dále možnost generování DC signálu na výstupu DAC.

Norma ČSN EN 60268-3 ed. 2 se zabývá měřením audio výkonových zesilovačů. Pro potřeby této práce není zapotřebí měřit všechny parametry, jež norma uvádí. Příkladem je např. měření amplitudových charakteristik balancérů a ekvalizérů nebo chování zesilovačů při nestandardních napájecích podmínkách a výstupní výkon zesilovačů.

9.1 Česká technická norma ČSN EN 60268-3 ed. 2

Tato technická norma, nesoucí název: Elektroakustická zařízení - Část 3: Zesilovače, platná od 1. 2. 2014 se zabývá audio zesilovači, provozními podmínkami, měřením parametrů a udává, které informace by měl výrobce zesilovače uvádět. [18]

9.1.1 Jmenovité podmínky

ČSN EN 60268-3 ed. 2 uvádí sadu podmínek, které platí pro měření výkonových zesilovačů (pokud není vysloveně uvedeno jinak). V normě je popsáno dodržení zejména provozních podmínek zesilovače, napájecího zdroje, impedance zátěže, kvalita měřících přístrojů a atmosférické podmínky prostředí. Následuje zkrácený výpis těch nejdůležitějších podmínek z kapitol 3 až 13 normy ČSN EN 60268-3 ed. 2. Podrobný popis je umístěn v přílohách (Příloha 1 – Jmenovité podmínky měření výkonových zesilovačů dle ČSN EN 60268-3 ed. 2)

V zásadě se jedná o to, aby byl zesilovač zapojen tak, jak uvádí výrobce (jedná se zejména o napájení a připojenou zátěž), a také, aby byl zesilovač měřen v podmínkách podobným běžnému použití. Současně má být měřen pouze jeden kanál, referenčním budícím signálem má být signál sinus o frekvenci 1 kHz a amplitudě rovné přibližně 1/3 maximálního vybuzení, než se zesilovač dostane do limitace.

10 Postupy měření výkonových zesilovačů

10.1 Lineární režim

Tento stav je výchozím nastavením pro většinu měření parametrů zesilovačů. Je to situace, kdy zesilovač pracuje ve vhodných podmínkách a není přetěžován. Úroveň výstupního signálu je přibližně 1/3 úrovně, oproti stavu, kdy začíná zesilovač limitovat výstupní signál.

Lineární režim je definován dvěma způsoby. Norma mluví o nastavení ovladače hlasitosti do takové úrovně, aby se na výstupu objevil signál, zkreslený nějakou úrovní THD. Ohledně míry THD není norma příliš jasná, mírou má být buď výrobcem stanovená úroveň THD nebo maximální úroveň 1 %.

Při buzení zesilovače na tuto míru THD se sníží úroveň vstupního signálu o -10 dB, což odpovídá snížení amplitudy budícího signálu na přibližně 33 %. [18]

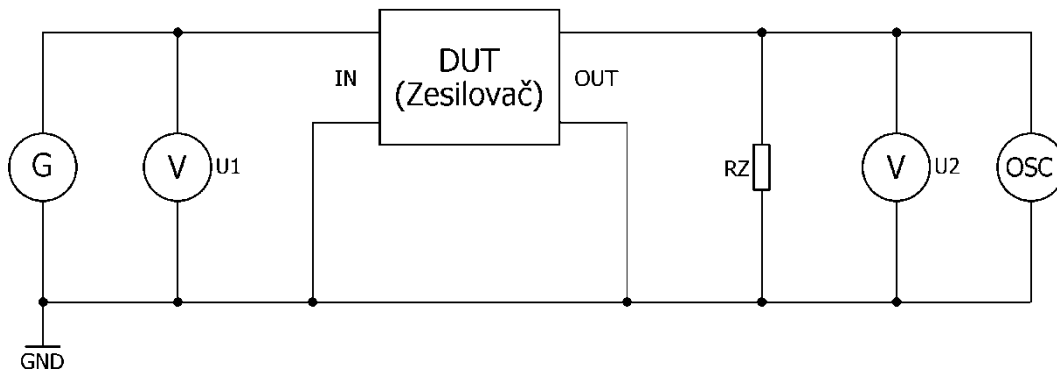
Druhou definicí je maximální sinusové napětí na vstupu, kdy ještě není výstupní napětí limitováno a nedochází k saturaci. Opět se v této situaci sníží úroveň vstupního napětí o -10 dB, což odpovídá přibližně 33 % amplitudy původního buzeného signálu. Pro měření bylo využito tohoto způsobu. [20]

Následující měřicí postupy a schémata jsou uvedena dle normy pro měření klasickými stolními přístroji a potřebnými přípravky. Tester využívá DAQ měřicí karty, přičemž jeden kanál je použit pro navzorkování signálu na vstupu zesilovače a druhý pro navzorkování výstupního signálu. Použití přeladitelné pásmové zadržky je nahrazeno výpočtem amplitudového spektra pomocí FFT.

10.1.1 Postup měření lineárního režimu

- Musí být dodrženy jmenovité podmínky pro měření (viz Kap. 9.1.1).
- Zesilovač se začne budit sinusovým signálem o frekvenci 1 kHz s malou amplitudou, která se bude postupně zvyšovat (cca 100 mV).
- Regulátor hlasitosti má být nastaven do polohy maximálního zesílení.
- Zapojeným osciloskopem a voltmetry budeme chápat měřicí kartu od National Instruments, zapojenou na vstupní a výstupní svorky zesilovače, ale je možné i použití klasického stolního přístroje.
- Je třeba pozvolna zvyšovat napětí na generátoru, až bude na osciloskopu vidět limitaci výstupního sinusového signálu.
- Těsně na hranici limitace signálu je třeba zaznamenat napětí na výstupu U_2 , což je maximální výstupní napětí. Aby byl nastolen lineární režim zesilovače, je třeba snížit zdroj signálu o -10 dB. To odpovídá přibližně 1/3 vstupního původního signálu.
- Amplituda signálu z generátoru se sníží tak, aby bylo výstupní napětí U_2 přibližně rovno 33 % původní hodnoty maximálního napětí.

- Napětí na generátoru U_1 je nyní výchozí hodnotou pro další měření, pokud nebude řečeno jinak.



Obr. 15 – Schéma zapojení pro měření lineárního režimu

10.2 Amplitudová frekvenční charakteristika

Amplitudově frekvenční charakteristika je funkce, jež udává závislost výstupní amplitudy zesilovače na frekvenci vstupního signálu. Je to velmi důležitý parametr, který určuje, v jakém frekvenčním pásmu je zesilovač schopen pracovat a jaké zesílení máme při různých frekvencích očekávat.

V oblasti audio je klasickým frekvenčním pásmem zesilovačů běžné slyšitelné pásmo, tzn. rozsah frekvencí od 20 Hz do 20 kHz. Pro potřeby generování zkušebních signálů je samozřejmě velice důležité, aby zesilovač měl co nejširší pásmo, popřípadě aby bezpečně pokryl frekvenční pásmo požadované pro generování požadovaných zkušebních signálů.

Norma ČSN EN 60268-3 ed. 2 se nijak nezmiňuje o frekvenčním pásmu, ve kterém by se mělo měření provádět. V audio pásmu by měření probíhalo ve slyšitelném pásmu frekvencí (20 Hz – 20 kHz), ale pro potřeby generování zkušebních signálů je samozřejmě velice důležité, aby zesilovač měl co nejširší frekvenční pásmo.

Co se týče omezení při měření, shora je technickým omezením vzorkovací frekvence měřicí karty. V případě NI PCI 4472 je to 100 kS/s, takže teoretická maximální frekvence vzorkovaného signálu bez vyšších harmonických je 50 kHz. Maximální vzorkovací frekvence je určena Shannon - Kotělníkovým teorémem (označován také Nyquistův teorém):

„Přesná rekonstrukce spojitého, frekvenčně omezeného signálu z jeho vzorků je možná jenom tehdy, pokud byl vzorkován frekvencí alespoň dvakrát vyšší, než je maximální frekvence rekonstruovaného signálu“ [19]

10.3 Efektivní frekvenční pásmo

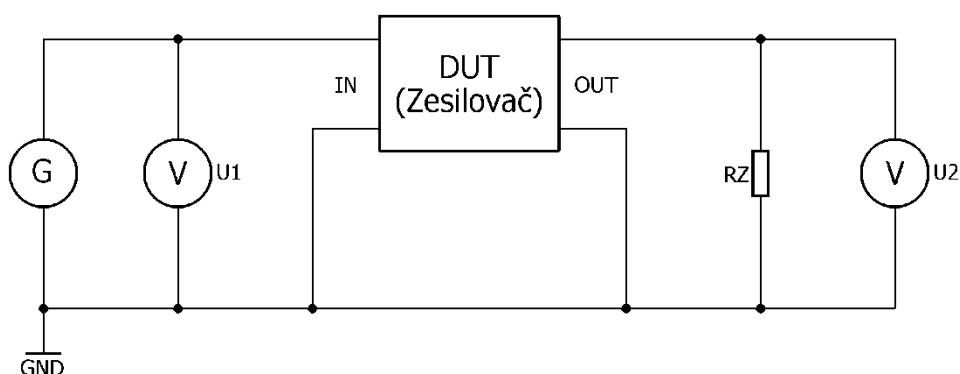
Frekvenční charakteristika jako taková bývá ve svých krajních mezích vždy utlumená. Proto byl zaveden pojem efektivní frekvenční pásmo a norma jej definuje jako pokles výstupní amplitudy o maximálně -3 dB oproti frekvenci sinusového signálu 1 kHz (ČSN EN 60268-3 ed. 2 kapitola 14.11.1). [18]

10.3.1 Postup měření efektivního frekvenčního pásma

- Musí být dodrženy jmenovité podmínky pro měření (viz Kap. 9.1.1).
- Generátor vstupního signálu je nastaven na signál sinus o frekvenci 1 kHz.
- Změří se výstupní napětí U_2 .
- Po krocích se mění frekvence signálu, přičemž napětí generátoru U_1 musí zůstat konstantní.
- Pro každou změnu frekvence generátoru se zaznamená hodnota výstupního napětí U_{2ref} .
- Výsledek (zesílení) se určí jako poměr výstupního napětí při různých frekvencích oproti referenčnímu napětí při frekvenci 1 kHz podle vzorce:

$$A_u = 20 \cdot \log \frac{U_2}{U_{2ref}}, (\text{dB}; V; V) \quad (5)$$

- Frekvence, při které je hodnota zesílení menší než -3 dB oproti referenční hodnotě zesílení při signálu 1 kHz, je označena jako horní efektivní frekvence (pro frekvenci < 1 kHz) a horní efektivní frekvence (pro kmitočet > 1 kHz).
- Efektivní frekvenční pásmo je ohraničeno těmito dvěma frekvencemi.



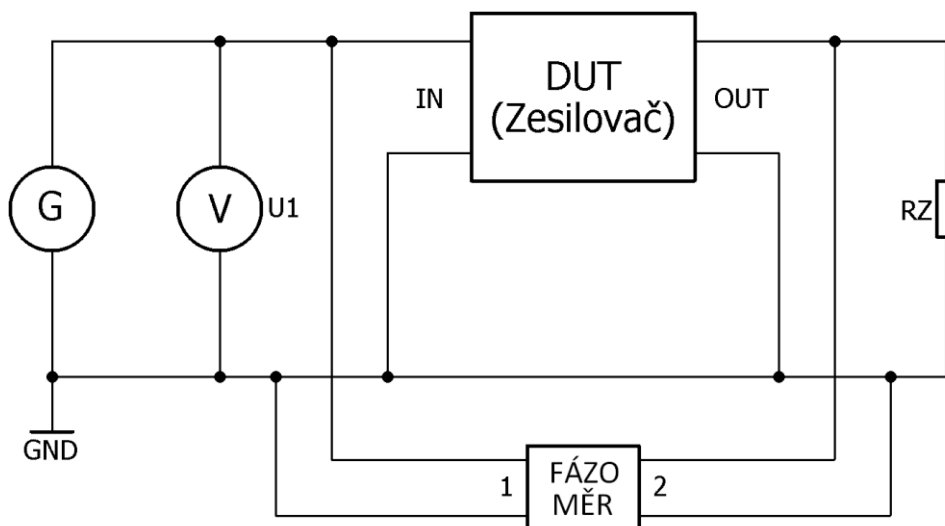
Obr. 16 – Schéma zapojení pro měření amplitudové charakteristiky

10.4 Fázová frekvenční charakteristika

Fázová charakteristika udává, jak se mění fáze výstupního signálu oproti vstupnímu signálu. Většinou se udává ve stupních nebo také v radiánech. ČSN EN 60268-3 ed. 2 tuto problematiku popisuje v kapitole 14.11.4 a pro audio účely ji uvádí jako nepovinný údaj. Pro měřicí techniku je však podstatná. Norma definuje fázovou frekvenční charakteristiku jako rozdíl fáze mezi vstupním a vstupním napětím, jakožto funkci frekvence pro různé polohy ovládacích prvků.

10.4.1 Postup měření fázové charakteristiky

- Musí být dodrženy jmenovité podmínky pro měření (viz Kap. 9.1.1).
- Generátor vstupního signálu je nastaven na signál sinus o frekvenci 1 kHz.
- Na vstupní a výstupní svorky se připojí vstupy fázoměru (přístroj je nahrazen AI kanály DAQ karty).
- Po krocích se mění frekvence signálu, přičemž napětí generátoru U_1 musí zůstat konstantní.
- Pro každou změnu frekvence generátoru se zaznamená hodnota fáze na vstupu a na výstupu zesilovače.



Obr. 17 – Schéma zapojení pro měření fázové charakteristiky

Norma definuje měření fáze za pomoci přístroje zvaného fázoměr. Pro automatizované měření bude využito jiného postupu. Měřicí obvod se sestaví dle Obr. 16 a fáze bude měřena napřímo pomocí měřicí karty.

Prvním krokem je navzorkování signálů na vstupu a na výstupu zesilovače. Jelikož jsou všechny kanály DAQ karet vzorkovány (téměř) současně, stačí pro oba signály vypočítat fázové spektrum a odečíst počáteční fázi pro požadované frekvence. Fázový posuv je určen jako rozdíl těchto dvou počátečních fází.

10.5 Odstup signál – šum (SNR)

Poměr signál – šum je důležitým parametrem nejen u audio techniky ale i pro všechny převodníky a zesilovače. SNR udává, kolik šumu je obsaženo v užitečném signálu a jakožto poměr je udáván v decibelech. Platí, že čím vyšší je odstup signálu od šumu, tím lépe.

Norma se v kapitole 14.13 zabývá měřením při různých nastaveních ovladačů např. hlasitosti nebo při sníženém nebo zvýšením napájecím napětí ze sítě. Pro tyto měření jsou udány dvě hodnoty SNR: první bude úroveň SNR pro maximální výstupní napětí a druhá pro lineární režim. Měření se provádí při testovacím signálu sinus 1 kHz. Hodnotu šumového napětí je možné získat několika způsoby: vstupní svorky zesilovače se odpojí, nebo se zkratují, nebo se mezi vstupní svorky zapojí rezistor o přibližné jmenovité hodnotě vstupní impedance zdroje. Pro účely měření bude zvolena možnost, kdy jsou vstupní svorky úplně odpojeny. [18] [21]

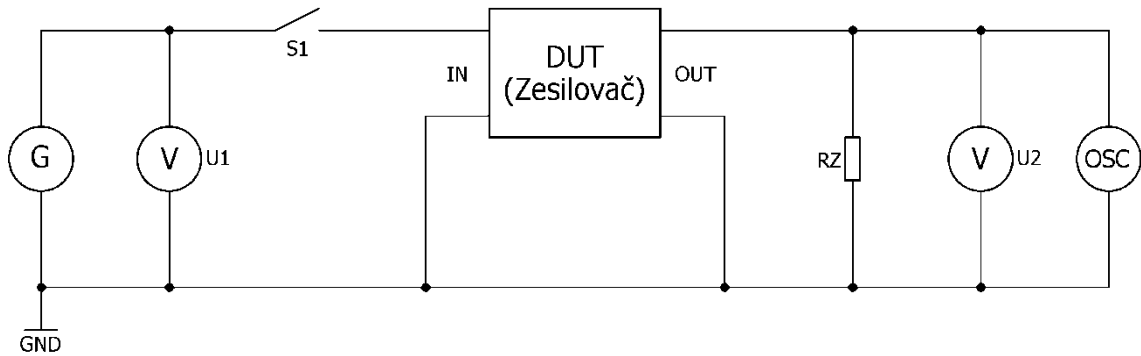
10.5.1 Postup měření SNR

- Musí být dodrženy jmenovité podmínky pro měření (viz Kap. 9.1.1).
- Připojí se generátor signálu sinusového průběhu o frekvenci 1 kHz – spínač S1 je sepnut.
- Na výstupních svorkách musí být připojena správná hodnota zátěže: 4 nebo 8 Ω .
- Úroveň vstupního napětí se nastaví tak, aby se na výstupu objevilo maximální napětí těsně před limitací. Zaznamená se výstupní napětí U_{2max} .
- Nyní se upraví úroveň vstupního napětí tak, aby se na výstupu objevilo napětí, odpovídající lineárnímu režimu (U_{2max} snižené o -10 dB). Zaznamená se výstupní napětí U_2 .
- Generátor signálu se odpojí a vstupní svorky se nechají rozpojené (rozeprnutí spínače S1).
- Zaznamená se úroveň šumového napětí na výstupu U_{2sum} .
- Odstup signál-šum pro maximální napětí se určí v decibelech podle vzorce:

$$SNR_{max} = 20 \cdot \log \frac{U_{2max}}{U_{2sum}}, (dB; V, V) \quad (6)$$

- Odstup signál-šum pro lineární režim se určí v decibelech podle vzorce:

$$SNR_{lin} = 20 \cdot \log \frac{U_2}{U_{2\text{šum}}} , (\text{dB}; \text{V}, \text{V}) \quad (7)$$



Obr. 18 – Schéma zapojení pro měření SNR

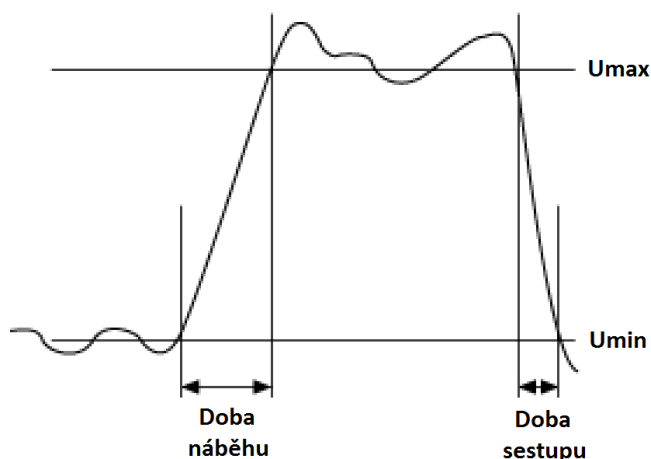
10.6 Rychlost přeběhu

Rychlost přeběhu vyjadřuje nejvyšší dosažitelnou změnu amplitudy výstupního napětí za určitý čas. Její jednotkou je V/s nebo také V/us. Tato vlastnost závisí na době náběhu a na velikosti výstupního napětí. [22]

Doba náběhu je definována jako čas, za který dosáhne výstupní napětí úrovně mezi 10 – 90 % maximální ustálené hodnoty. Budícím signálem je obdélníkový signál s frekvencí 1 kHz. Analogicky je definována i doba sestupu, jen je to čas, za který se hodnota dostane z 90 na 10 %.

Rychlost přeběhu se určí jako:

$$\text{Rychlost přeběhu} = \frac{U_{max} + |U_{min}|}{\text{Doba náběhu}} (\text{V} \cdot \text{us}^{-1}; \text{V}, \text{V}, \text{us}) \quad (8)$$



Obr. 19 – Ukázka grafu pro výpočet doby náběhu v LabVIEW

10.6.1 Postup měření rychlosti přeběhu

Zesilovač bude buzen obdélníkovým signálem na maximálním vybuzení. Měření by nemělo trvat dlouho, neboť takovýto signál značně zatěžuje zesilovač. Schéma zapojení je totožné jako Obr. 16.

- Musí být dodrženy jmenovité podmínky pro měření (viz Kap. 9.1.1).
- Zesilovač musí být buzen obdélníkovým signálem 1 kHz o takové amplitudě, aby se na výstupu objevilo maximální napětí před limitací (vychází z měření lineárního režimu).
- Na výstup zesilovače bude připojen osciloskop (resp. měřicí karta). Na osciloskopu se sleduje doba náběhu mezi 10 – 90 % ustálené hodnoty. Pokud osciloskop neobsahuje funkci měření doby náběhu (Rise Time), je nutné odečíst hodnotu ručně.
- Odečte se maximální a minimální napětí (nebo funkce Upp).
- Rychlost přeběhu se určí jako:

$$\text{Rychlost přeběhu} = \frac{U_{\max} + |U_{\min}|}{\text{Doba náběhu}} (\text{V} \cdot \text{us}^{-1}; \text{V}, \text{V}, \text{us}) \quad (9)$$

10.7 Činitel harmonického zkreslení THD a THD+N

THD udává, jak moc je sinusový signál zkreslen amplitudami vyšších harmonických složek základního signálu. V technické praxi je každý sinusový signál zkreslen určitou mírou harmonických složek. Míra THD se udává v obvykle v procentech, výjimečně v decibelech. Norma v kapitole 14.12.3 zmiňuje, že maximální úroveň THD by měla být pro koncové stupně menší než 1 %.

THD se vypočítá jako podíl součtu všech harmonických složek k amplitudě základní frekvence signálu:

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \cdot 100 (\%; V, V) \quad (10)$$

Obdobným parametrem je harmonické zkreslení plus šum THD+N, taktéž udáváno v procentech.

10.7.1 Ruční postup měření THD

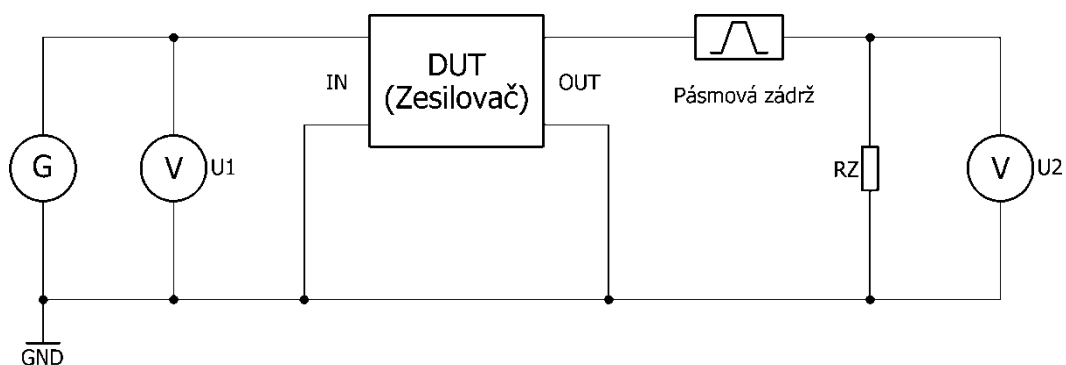
Postup přesně dle normy je poměrně obtížné dodržet, vzhledem k tomu, že je v zapojení požadováno využití strmé přeladitelné pásmové zadržky, aby na klasickém voltmetru vynikla pouze základní frekvence. Pro automatizované měření bylo využito jiného postupu, a to navzorkování výstupního signálu DAQ kartou a následný výpočet THD a THD+N pomocí funkcí, které vychází z vypočítání frekvenčního spektra a sečtení harmonických složek.

- Musí být dodrženy jmenovité podmínky pro měření (viz Kap. 9.1.1).
- Zesilovač je buzen sinusovým signálem o frekvenci 1 kHz, zdroj signálu musí mít vlastní úroveň THD alespoň o 10 dB nižší, než je očekávaná měřená úroveň THD zesilovače. Amplituda signálu odpovídá lineárnímu režimu.
- Změří se výstupní napětí na zesilovači U_{2ref} .
- Mezi výstup zesilovače a měřicí svorky se zařadí pásmová zadržka, nastavená na frekvenci vstupního signálu (1 kHz).
- Změří se výstupní napětí U_2 – to je napětí harmonických složek signálu.
- Činitel harmonického zkreslení se vypočítá jako:

$$THD = \frac{U_2}{U_{2ref}} \cdot 100 (\%; V, V) \quad (11)$$

THD je možné vypočítat i v dB jako:

$$THD = 20 \cdot \log \frac{U_2}{U_{2ref}} \text{ (dB; V, V)} \quad (12)$$



Obr. 20 – Schéma zapojení pro měření THD

Měření je možné opakovat pro různé frekvence a úrovně budícího napětí. Pro měření při různých frekvencích však zůstává požadavek na přeladitelný, vysoce selektivní filtr typu pásmová zadrž. Pro automatizované měření bylo využito výše uvedeného postupu, který zahrnuje navzorkování signálu DAQ kartou a následné výpočty z amplitudového spektra.

11 Postupy měření DAC převodníků a DAQ karet NI

Měření má své odlišnosti, ale velká část postupů principiálně vychází z měření, které jsou popsány v Kap. 10 – Měření výkonových zesilovačů. Vzhledem k absenci analogové vstupní části nemohou být měřeny všechny parametry, jako u analogových zesilovačů.

11.1 Měření vlastností výstupního signálu v závislosti na výstupní úrovni

Jelikož se jedná o DAC převodníky, nelze počítat zesílení z klasických vzorců. Namísto toho bude na výstupu generován sinusový signál o frekvenci 1 kHz. Amplituda výstupního signálu se reguluje v procentech v rozsahu 0 – 100 %. Data k zápisu na zvukovou kartu jsou v LabVIEW očekávána v rozsahu -1,0 – 1,0. V tomto rozsahu budou vždy data generována a výstupní úroveň bude ovládána pomocí úrovně výstupního napětí v procentech.

Programově se tedy zvyšuje úroveň signálu a měřicí kartou, připojenou na výstup převodníku je vzorkován signál, podobně jako u výkonového zesilovače. Pro každou úroveň výstupního signálu jsou vyhodnoceny tyto parametry:

- Výstupní amplituda,
- THD,
- THD+N.

Všechny tyto parametry jsou vykreslovány v grafu. Navíc jsou zobrazeny i hodnoty, naměřené pro maximální úroveň signálu, kde se očekává nejmenší zkreslení signálu z důvodu využití plného rozsahu převodníku.

11.2 Měření vlastností DAC převodníků při různých frekvencích signálu

Do této kategorie se řadí parametry převodníků, které se měří pro různé výstupní frekvence signálu. Pro měření je generován sinusový signál o maximální amplitudě, kterou převodník umožňuje (100 %). Mezi měřené parametry patří:

- Amplitudově frekvenční charakteristika,
- Závislost THD na frekvenci výstupního signálu,
- Závislost THD+N na frekvenci výstupního signálu.

Všechny uvedené parametry jsou vykreslovány v grafu. Většina zvukových karet je konstruována a testována pro rozsah frekvencí od 20 Hz do 20 kHz. Při tomto měření budou DAC převodníky testovány v širším pásmu frekvencí a sleduje chování převodníku v těchto oblastech. Minimální frekvence je 1 Hz. U takto nízké frekvence je možné, že některé zvukové karty tuto frekvenci vyhodnotí jako DC signál a dojde k omezení výstupu z důvodů ochrany navazujícího audiořetězce.

Pro generování maximálních frekvencí je nutné mít na paměti Nyquistův teorém. Teoreticky nejvyšší generovaná sinusová frekvence je jedna polovina vzorkovací frekvence převodníku.

Běžné kmitočty DAC převodníků jsou 44,1 kHz; 48 kHz; 96 kHz nebo 192 kHz. Při testování jsou převodníky prověřovány téměř do maximální možné frekvence, kterou DAC převodník umožní vygenerovat. Za těchto podmínek se samozřejmě očekává vysoká úroveň harmonického zkreslení.

11.3 Rychlost přeběhu

Podobně jako při měření výkonových zesilovačů je na převodníku generován obdélníkový signál o frekvenci 1 kHz a maximální amplitudě. Rychlost přeběhu je vyhodnocena z doby náběhu a maximální amplitudy signálu. U převodníků s vyšší vzorkovací frekvencí se dá očekávat lepší výsledky.

11.4 Schopnost generovat DC signál

Vlastností, která je pro generování testovacích signálů důležitá je schopnost převodníku generovat stejnosměrný signál. Tento signál je pro zvukové karty velice netypický a je možné, že některé převodníky jsou vybaveny ochranou před DC složkou kvůli možnému poškození navazujícího audiořetězce. I přesto je sledováno chování převodníků v této situaci.

11.5 Netestované parametry

Jelikož se jedná o naprosto jiná zařízení než analogové výkonové zesilovače, není možné měřit totožné parametry obou skupin. Není možné měřit posun fáze, neboť na vstupu převodníku je digitální signál. Dále je pro účely této diplomové práce zbytečné měřit výstupní výkon. Pokud bude dodržena výstupní zátěž, nebude převodník přetěžován. Vlastností, jež měřena nebude je odstup signál od šumu u DAC převodníku. Důvod je ten, že u DAC převodníku není tato vlastnost kriticky důležitá a také proto, že na pracovišti VŠB-TUO není dostupný HW, kterým by bylo možné správně SNR měřit. SNR se u převodníku očekává tak vysoké (pro FiiO X3 v2 výrobce uvádí > 113 dB) a nejlepší měřicí karta NI PCI 4472 je schopna měřit s odstupem nižším (99 dB).

11.6 Postupy měření analogových výstupů karet NI

Tato měření jsou principiálně velmi blízká měření DAC převodníků. Rozdílem je ovládání výstupní úrovně, kdy u analogových karet NI je možné přesně zvolit výstupní napětí. Byla měřena i schopnost

generovat DC signál. Tato schopnost se u karet NI očekává, na rozdíl od zvukových karet. Mezi měřené parametry patří:

- Měření převodní charakteristiky při 1 kHz,
- Měření THD při 1 kHz,
- Měření THD+N při 1 kHz,
- Amplitudově frekvenční charakteristika,
- Průběh THD na frekvenci,
- Průběh THD+N na frekvenci,
- Rychlost přeběhu,
- Reakce na vstupní DC signál.

12 Použité DAQ karty s analogovými vstupy výrobce NI

12.1 Karta NI PCI 4472

Tato měřicí karta je určena pro měření v oblasti audio a její rozlišení je 24 bitů. Bude použita pro většinu měření, pokud to umožní její vzorkovací frekvence. Disponuje 8 analogovými vstupy, jež jsou vzorkovány rychlostí až 102,4 kS/s. Vstupní rozsah karty je pevný ± 10 V. Odstup signálu od šumu je více než 99 dB. Karta je připojena do PC pomocí sběrnice PCI.

Chyba karty je uváděna jako $\pm 0,1$ dB při frekvenci signálu 1 kHz, přepočít na chybu v procentech:

$$\text{Chyba v \%} = 10^{\frac{\text{Chyba v dB}}{20}} = 10^{\frac{0,1}{20}} = \pm 1 \% \text{ z měřené hodnoty [23]}$$

DC offset = ± 3 mV



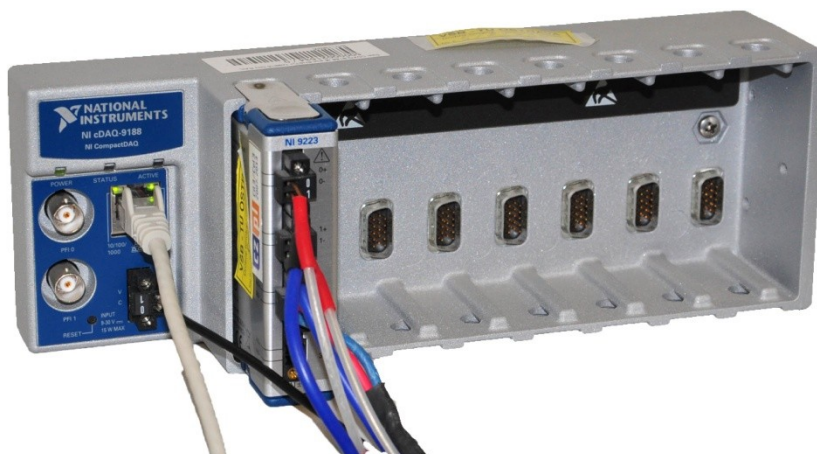
Obr. 21 – DAQ karta NI PCI 4472

12.2 Karta NI 9223

Měřicí karta série C, vzorkující rychlostí 1 MS/s na čtyřech analogových kanálech. Tato karta má rozlišení jen 16 bit, ale za to se díky své vzorkovací rychlosti více hodí pro vzorkování signálů s vyšší frekvencí, než NI PCI 4472. Vstupní rozsah je rovněž pevný ± 10 V. Typická přesnost nekalibrované karty při běžných pokojových teplotách je:

Chyba = $\pm 0,2 \%$ z měřené hodnoty a $\pm 0,1 \%$ z rozsahu

Tato karta je fyzicky zapojena do síťového racku NI CompactDAQ 9188, který pojme až 8 zařízení řady C a komunikuje přes Ethernet.



Obr. 22 – DAQ karta NI 9223 zapojená v CompactDAQ 9188

12.3 Osciloskopická karta USB 5133

Měřicí karta, primárně určená pro použití jako osciloskop (na PC se spustí aplikace, která zobrazí čelní panel podobný jako u klasických osciloskopů) a dá se využít i jako měřicí karta. Vzorkovací rychlost je 100 MS/s, daní za tuto rychlost je nízká rozlišovací schopnost pouze 8 bitů. Karta dokáže měřit až na dvou analogových kanálech a bude použita pro měření, kde je nutné zajistit navzorkování signálu vysokou rychlostí – měření rychlosti přeběhu. Komunikace s PC je zajištěna pomocí rozhraní USB. Tato karta disponuje možností přepínat rozsahy, a to v sedmi rozsazích od 0,04 V až po 40 V.

Chyba = $\pm 2 \%$ z měřené hodnoty $\pm 1 \%$ z rozsahu + 300 μV

Měřicí rozsahy karty 5133 (V_{pp}): 0,04; 0,1; 0,2; 0,4; 1; 2; 4; 10; 20; 40.

Šum RMS je udáván jako: 0,55 % rozsahu pro rozsah 0,04 V a 0,35 % z rozsahu pro ostatní rozsahy.



Obr. 23 – DAQ karta NI USB 5133

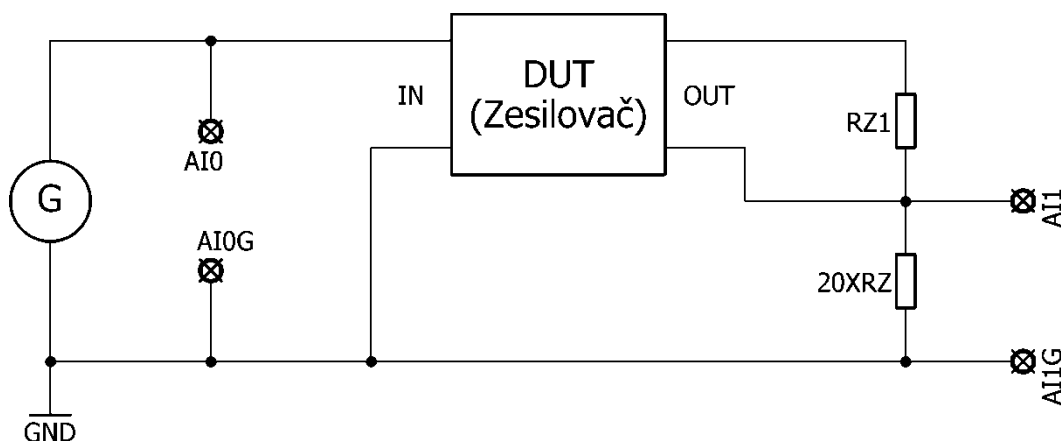
Průběh měření s touto kartou je odlišný, než u klasických měřících karet NI. Maximální vzorkovací frekvence této osciloskopické karty je 100 MS/s a je možné současně měřit na dvou kanálech. Karta komunikuje prostřednictvím rozhraní

S touto kartou se měří tak, že se nastaví měřící parametry, jako je rozsah, rozlišení, vzorkovací rychlost a počet vzorků a buď okamžitě, nebo dle analogového triggeru se spustí měření. Jakmile se odměří signál dle nastaveného časového okna T_w , data jsou odeslána prostřednictvím USB do aplikace v LabVIEW a následně zpracována. Po odeslání dat je možné spustit další měření.

NI USB 5133 bude i přes svou malou rozlišovací schopnost 8 bit použita pro měření rychlosti přeběhu. Při tomto typu měření je kriticky důležité správně navzorkovat (ideálně) ostrou hranu obdélníkového signálu, z ní určit dobu náběhu a následně vypočítat rychlost přeběhu. Teoretická minimální doba náběhu, kterou je možné správně navzorkovat, vychází z maximální vzorkovací frekvence měřící karty. Pokud bude náběžná (nebo sestupná) hrana navzorkována méně než cca 10 vzorky, bude doba náběhu určena velice nepřesně. Minimální doba náběhu (a sestupu) pro vzorkovací rychlost 100 MS/s je přibližně 100 ns. Proto je možné měřit 100 krát rychlejší dobu náběhu, než kartou NI 9223 a tisíckrát strmější hranu, než kartou NI PCI 4472.

13 Popis programů pro měření výkonových zesilovačů

13.1 Obecné schéma zapojení pro všechny DAQ karty NI



Obr. 24 – Schéma zapojení DAQ karet pro měření výkonových zesilovačů

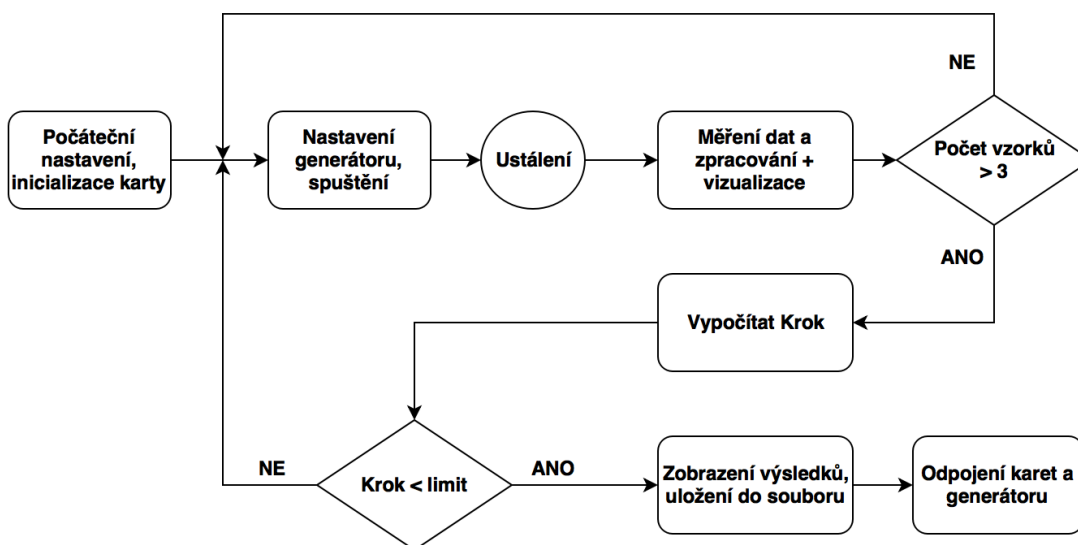
Na Obr. 24 je uvedeno univerzální schéma zapojení pro měření všech výkonových zesilovačů. Analogové kanály AI0 měřících karet budou vždy zapojeny na vstup zesilovače (výstup signálového generátoru) a analogové kanály AI1 budou použity pro měření výstupního napětí zesilovače. Vzhledem k malému vstupnímu rozsahu většiny měřících karet (± 10 V) a velkému výstupnímu napětí zesilovačů (až 150 V) je nutné snížit výstupní měřené napětí napěťovým děličem (snížené napětí bude v programu kompenzováno). Proto je na výstup zesilovače nutné zapojit napěťový dělič alespoň 1:20. Pokud bude maximální výstupní napětí jiného zesilovače menší, je vhodné zvolit jiný poměr děliče, aby byl optimálně využit pevný rozsah měřících karet.

Pro buzení výkonových zesilovačů je použit signálový generátor Agilent 33500B. Ovládání je zajištěno prostřednictvím vrstvy VISA z LabVIEW. Pro správnou činnost je zapotřebí stáhnout přístrojový driver ze stránek National Instruments. [24]



Obr. 25 – Signálový generátor Agilent 33500B

13.2 Popis algoritmu pro měření lineárního režimu

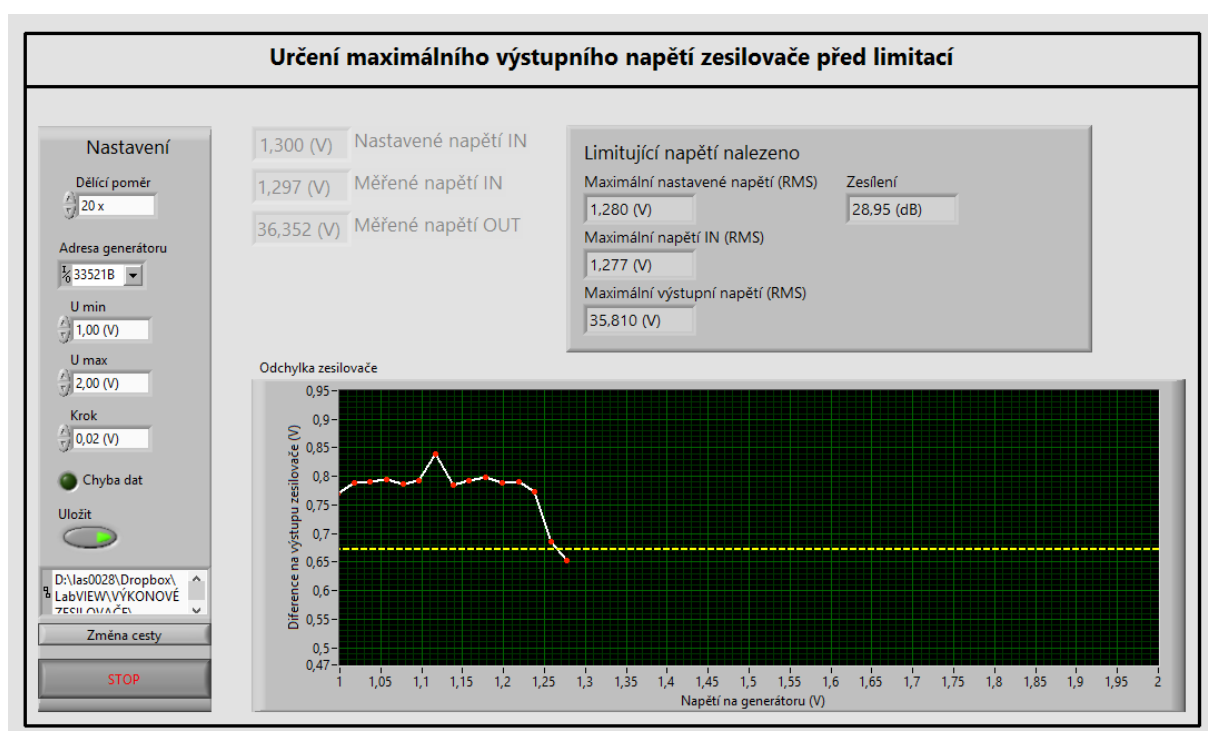


Obr. 26 – Zjednodušené blokové schéma pro měření lineárního režimu výkonových zesilovačů

- Místo voltmetrů jsou na měřicí body připojeny vstupní svorky analogových kanálů DAQ karty NI PCI 4472. Měřicí kanál AI0 vždy představuje vstup zesilovače (výstup generátoru) a kanál AI1 je vždy připojen na vhodnou odbočku napěťového děliče na výstupu zesilovače.

- Generátor signálu je ovládán z LabVIEW přes komunikační vrstvu VISA. Výstupem je signál sinus o frekvenci 1 kHz, amplituda bude zvyšována po krocích.
- V každém cyklu programu se změří napětí na vstupu a výstupu zesilovače a vypočítá se zesílení.
- Míra zesílení je do limitace přibližně konstantní. Když je zaznamenán pokles zesílení, je zřejmé, že zesilovač ořezává výstupní signál a nastává limitace.

Hlavním spouštěcím souborem je *main_lin.vi*.



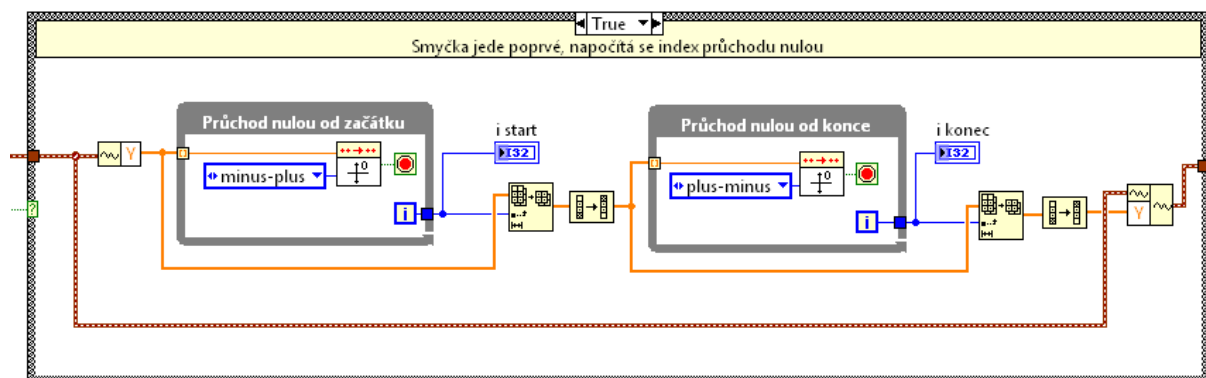
Obr. 27 – Čelní panel aplikace pro měření lineárního režimu

Celý program je běží ve smyčce WHILE, která se opakuje, dokud není nalezeno saturační napětí. Samotnou smyčku WHILE předchází jedno okno struktury FLAT SEQUENCE, ve kterém se provádí nastavení konstant a prvků čelního panelu. Po ukončení běhu hlavní smyčky WHILE následuje odpojení od generátoru signálu a měřící karty a případné uložení dat do souboru.

Při inicializaci se stanoví napěťové úrovně, které se nastavují na výstup generátoru. První hodnota z napětí se nastaví na generátor, pak program čeká 500 ms na ustálení výstupního napětí generátoru, a kartou 4472 se měří rychlostí 100 kS/s celkem 25000 vzorků.

Důležitým krokem při zpracování signálu a následné vyhodnocení efektivních hodnot a případných FFT je zajištění celistvého počtu period vzorkovaného signálu. Tato podmínka je zajištěna prostřednictvím *hled_nulyX.vi*. Vstupem tohoto subVI jsou naměřené průběhy signálu. První průběh signálu je považován za referenční, ve dvou smyčkách WHILE se prochází data

a hledá se první průchod nulou od záporných hodnot do kladných od začátku. Podobným způsobem se ošetří i konec pole tak, aby byl zajištěn celistvý počet period (hledání průchodu nulou od kladných hodnot do záporných). Přebývajících vzorky se zahodí a uloží se indexy prvního a posledního prvku v poli. U všech dalších navzorkovaných průběhů se zahodí prvky dle indexů z prvního signálu. Tím je zajištěno správné měření efektivní hodnoty, popř. FFT a zároveň na takto upravených datech lze jednoduše provést určení fázového posuvu mezi kanály.

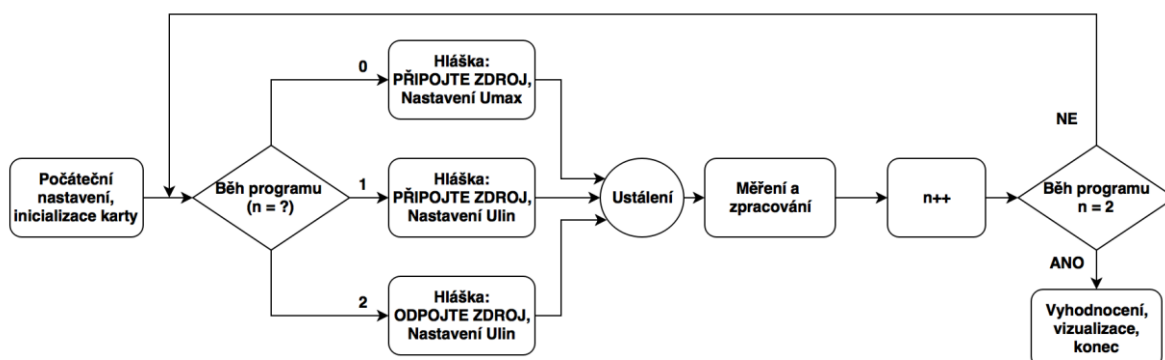


Obr. 28 – Zajištění celistvého počtu period signálu pro první kanál

Z naměřených dat se stanoví efektivní hodnoty napětí a vypočítá se zesílení. Takto se naměří celkem 3 hodnoty a určí se tzv. *Krok* – je to rozdíl zesílení mezi dvěma kroky napětí. V dalších bězích cyklu se testuje, zdali není vypočítané zesílení menší, než stanovená mez. Pokud ano, nastalo přebuzení.

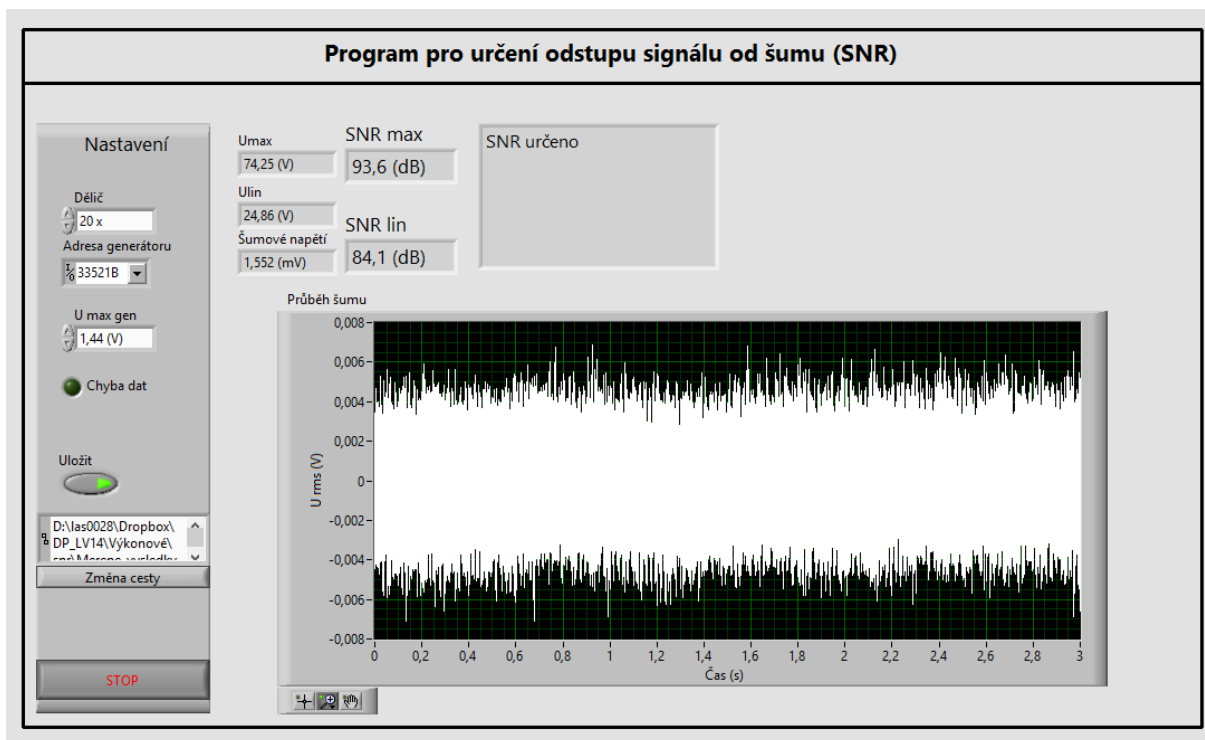
Při přebuzení se běh programu ukončí a jako výsledek se stanoví předchozí hodnota výstupního napětí.

13.3 Popis programu pro měření SNR



Obr. 29 – Zjednodušené blokové schéma pro měření SNR výkonových zesilovačů

- Místo voltmetru je na vhodnou odbočku napětového děliče na výstupu zesilovače připojen kanál AI1 karty NI PCI 4472.
- Generátor je ovládán z LabVIEW přes komunikační vrstvu VISA. Výstupem je signál sinus o frekvenci 1 kHz, uživatel nastaví hodnotu pro U_{\max} , následně bude nastavena hodnota pro lineární režim.
- Program provádí měření výstupní amplitudy pro maximální vybuzení, pak v lineárním režimu a následně uživatel odpojí vstupy zesilovače a měří se šumové napětí.
- Z naměřených efektivních hodnot napětí se určí odstup signálu od šumu (SNR) v dB.



Obr. 30 – Čelní panel aplikace pro měření SNR

Hlavním spouštěcím souborem je *main_SNR.vi*.

Struktura programu je podobná programu pro měření lineárního režimu. Cyklus WHILE běží celkem třikrát. Při prvním běhu je uživatel prostřednictvím dialogového okna vyzván, aby připojil vstupní svorky zesilovače. Následně se měří maximální výstupní napětí zesilovače. V druhém běhu smyčky WHILE se nastaví výstupní napětí pro lineární režim. Znovu se měří průběhy a určí se efektivní hodnota napětí. V posledním, běhu programu je uživatel prostřednictvím dialogového okna opět vyzván, aby fyzicky odpojil vstupní svorky zesilovače. Tento postup vychází z normy (Kap. 10.5.1). Následuje změření šumových vlastností zesilovače. Napětí na generátoru je ponecháno z předchozího kroku, a pokud uživatel neodpojil vstupní svorky zesilovače, algoritmus vyhodnotí chybu.

Z naměřených hodnot jsou vypočítány odstupy signálu od šumu pro maximální rozkmit a také pro lineární režim (neboť i v tomto stavu bývá zesilovač provozován). Pro správnost výsledků je od naměřených vzorků odečtena střední hodnota, aby nebyl výsledek měření ovlivněn případnou DC složkou.

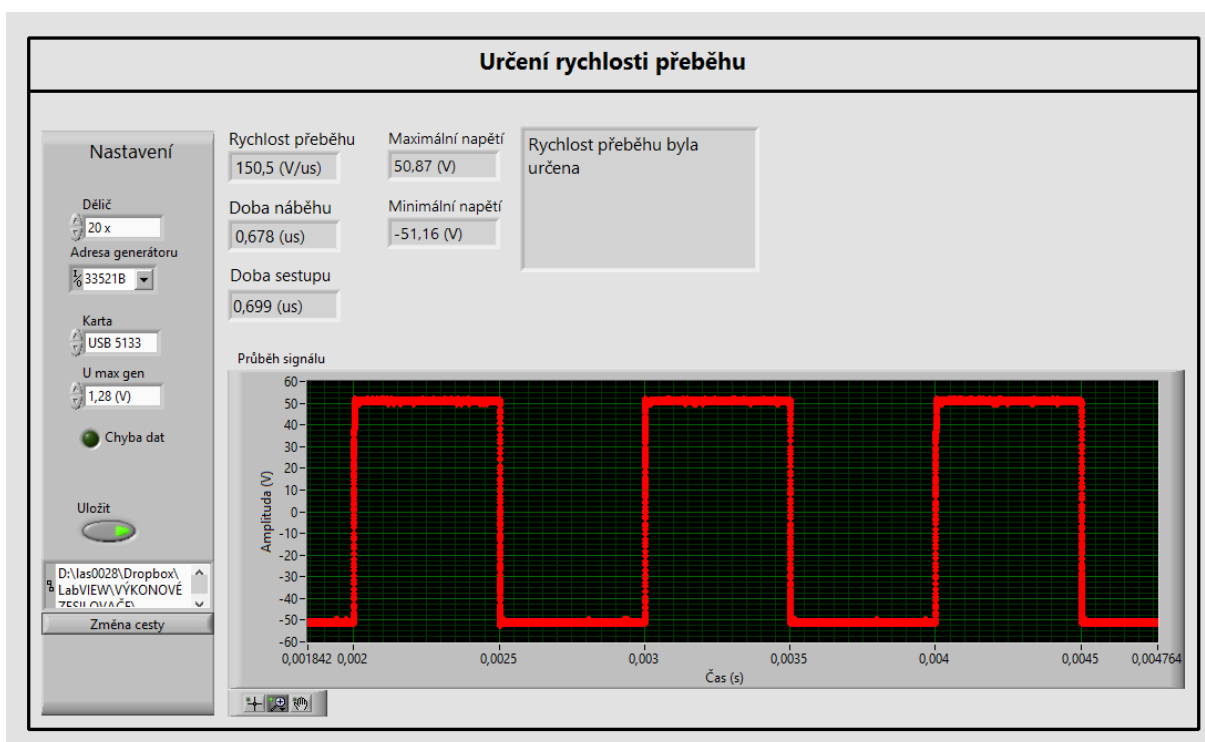
Program obsahuje některá identická subVI z programu pro určení lineárního režimu, jako třeba obsluhu ukládání dat do souboru, nastavení měřicích úloh nebo zajištění celistvého počtu period měřeného signálu.

13.4 Popis algoritmu pro měření rychlosti přeběhu



Obr. 31 – Zjednodušené blokové schéma pro měření rychlosti přeběhu výkonových zesilovačů

- Místo voltmetru bude na vhodnou odbočku napěťového děliče na výstupu zesilovače připojen kanál AI1 karty NI 9223, nebo osciloskopická karta NI USB 5133. Volba karty závisí na rychlosti měřeného zesilovače a v případě použití pomalé karty bude uživatel upozorněn.
- Generátor je ovládán z LabVIEW přes komunikační vrstvu VISA. Výstupem bude obdélníkový signál o frekvenci 1 kHz, uživatel nastaví hodnotu pro U_{\max} .
- Program se provede pouze jednou, zesilovač bude buzen obdélníkovým signálem, měřicí kartou budou navzorkována data a následně vyhodnoceny hodnoty pro určení rychlosti přeběhu.



Obr. 32 – Čelní panel aplikace pro měření rychlosti přeběhu

Hlavním spouštěcím souborem je *main_rychlost_prebehu.vi*.

V prvním kroku (kromě běžných úkonů pro natavení čelního panelu a inicializací karty a generátoru) je nastavení signálového generátoru. Výstupem bude obdélníkový signál o frekvenci 1 kHz a amplitudě, odpovídající maximálnímu rozkmitu.

Doba trvání měření včetně ustálení signálu je kratší než 2 sekundy. Při takto rychlém měření by nemělo dojít k nadměrnému ohřívání zesilovače vlivem obdélníkového signálu.

Z principu měření rychlosti přeběhu jde o co nejprecizněji navzorkovaný přechod z minimální do maximální hodnoty obdélníkového signálu. Jednoduchým výpočtem lze stanovit, s jakou periodou jsou vzorky zaznamenávány. Výpočet je uveden pro kartu NI 9223, která má rychlost vzorkování 1 MS/s. Měří s menší přesností (rozlišení 16 bit), než karta NI PCI 4472 (rozlišení 24 bit), ale tato přesnější karta je pro vzorkování strmé hrany obdélníkového signálu příliš pomalá.

$$T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{1 \cdot 10^6} = 1 \cdot 10^{-6} \text{s} = 1 \text{ us} \quad (13)$$

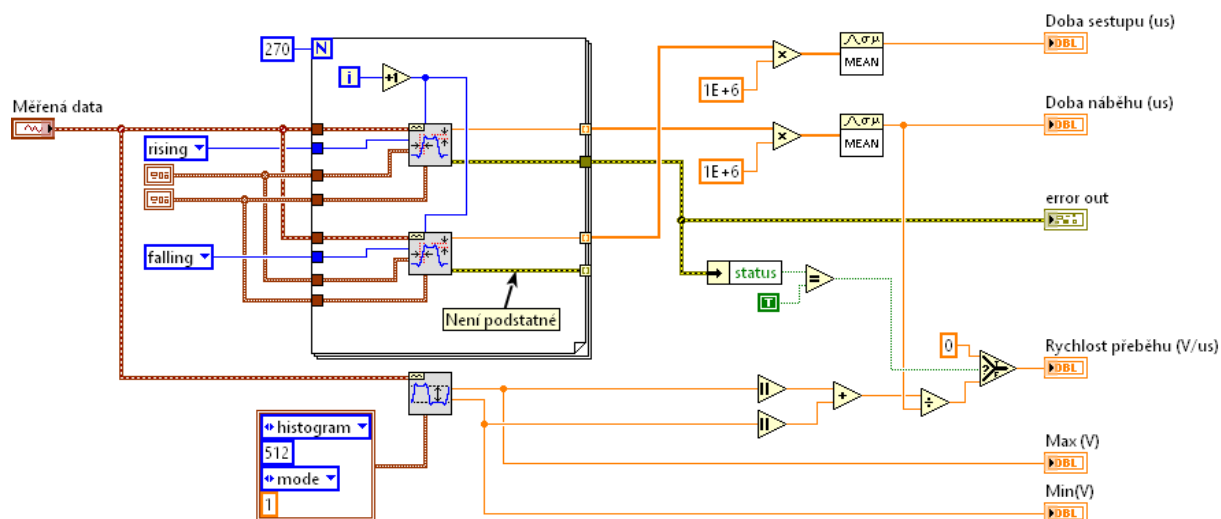
Měřicí karta NI 9223 se vzorkovací frekvencí 1 MS/s je schopna vzorkovat jednou za mikrosekundu. Za předpokladu, že hrana obdélníku musí být navzorkována alespoň několika vzorky, dá se stanovit, že doba náběhu musí být delší, než několik period vzorkování. Pokud bude tedy hrana obdélníkového signálu kratší než cca 10 mikrosekund, nedá se touto kartou doba náběhu a tudíž dobu přeběhu správně navzorkovat.

Rychlost vzorkování je nastavena na maximum 1 MS/s a počet vzorků 300.000. Tím je stanoveno časové okno T_w na 0,3 sekundy. Bude generován a vzorkován obdélníkový signál o frekvenci 1 kHz, za tu dobu bude tedy navzorkováno téměř 300 period signálu.

Pokud by byla doba náběhu i přesto příliš strmá, má uživatel možnost zvolit k měření druhou měřicí kartu. Jedná se o osciloskopickou kartu NI USB 5133. Tato karta měří s rozlišením 8 bit na desíti rozsazích, a vzorkuje maximální rychlostí až 100 MS/s. Touto kartou je možné navzorkovat hranu obdélníku, jejíž přechod trvá až 100 ns.

Po navzorkování a úpravě dat jsou vypočítány hodnoty: doba náběhu (us), doba sestupu (us), maximální a minimální napětí (V) pomocí subVI *vypocet_rychlosti_prebehu.vi*.

Jelikož jsou pro různé měřicí karty zvoleny různé doby vzorkování, obsahuje toto subVI mechanismus pro určení počtu period (vychází z velikosti časového okna a měřené frekvence signálu). Na všech periodách měřeného signálu se provede výpočet doby náběhu a sestupu prostřednictvím funkce *Transition Measurements*. Tato funkce pro každou periodu (prostřednictvím cyklu FOR) určí dobu náběhu a sestupu mezi 10 % a 90 % ustálené hodnoty signálu (vychází z normy). Hodnoty ze všech měření se zprůměrují. Dále se pomocí funkce *Amplitude and Levels* stanoví maximální a minimální ustálené hodnoty signálu.

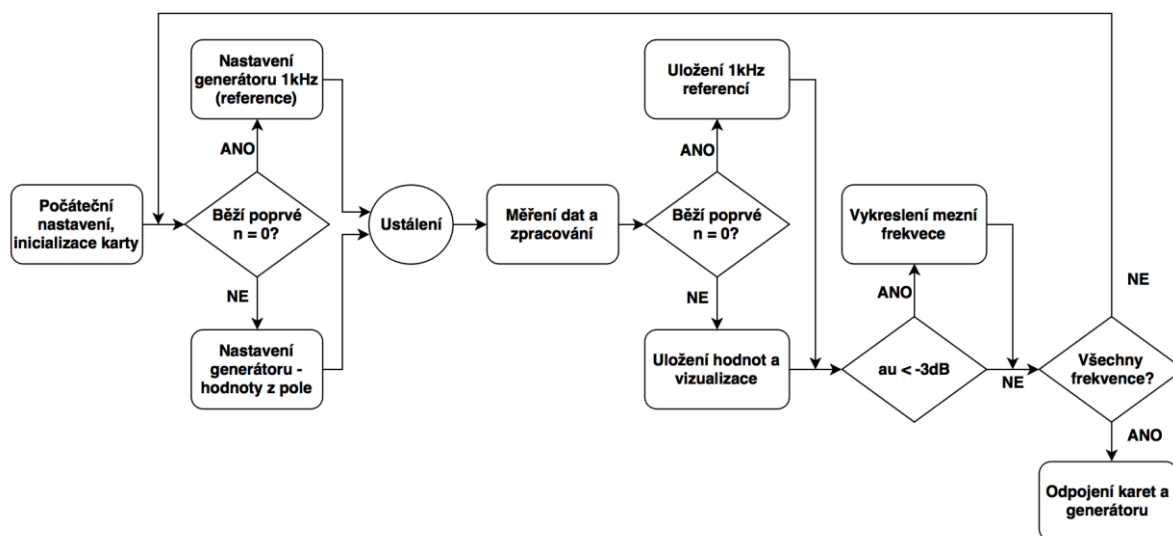


Obr. 33 – Stanovení rychlosti přeběhu

Samotná rychlost přeběhu se vypočítá dle rovnice č. 8 v Kap. 10.6.1. Po dokončení měření je vypnut výstup generátoru a na čelním panelu jsou zobrazeny výsledky: *Rychlost přeběhu*, *Doba náběhu*, *Doba sestupu*, *Maximální napětí* a *Minimální napětí*. V případě, že byla zvolena měřicí karta s pomalou vzorkovací rychlostí, je zobrazeno i oznámení, varující o možné nepřesnosti měření.

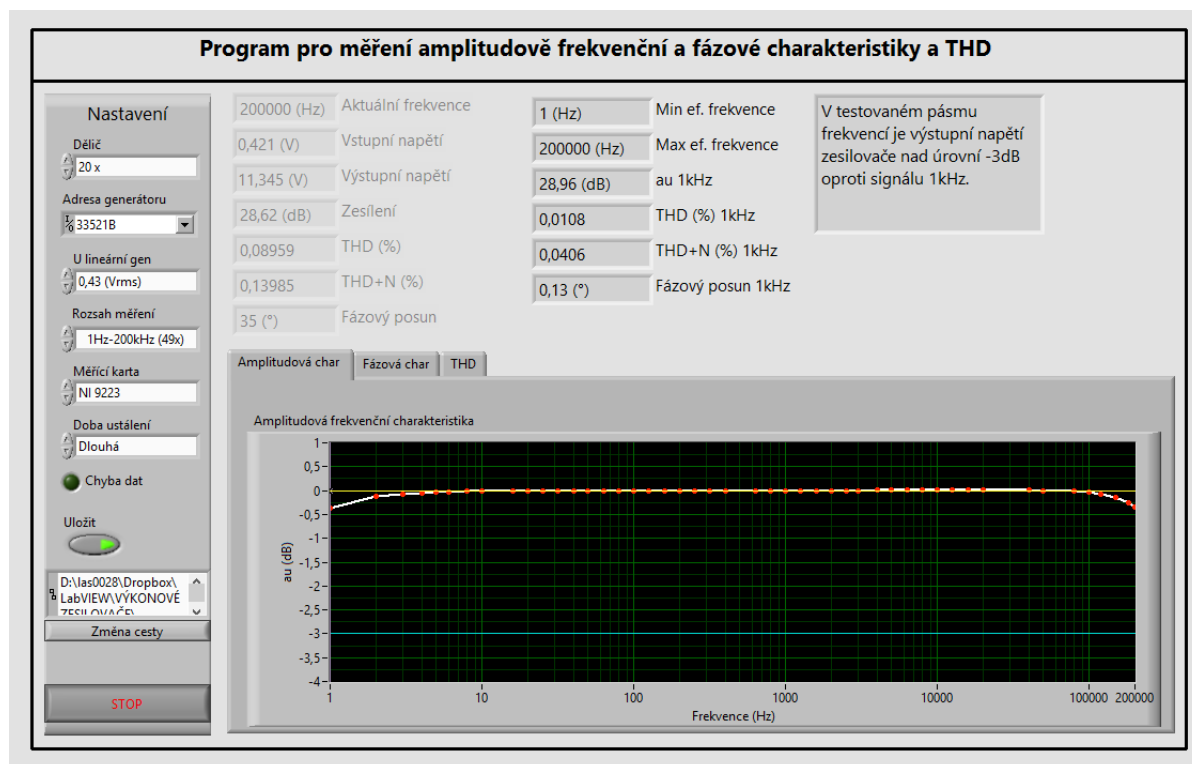
13.5 Popis algoritmu měření amplitudové a fázové charakteristiky, THD a THD+N

Tento program umožňuje několik měření dohromady, všechny charakteristiky se měří současně při jednom zapojení měřících karet a zátěže. Měřicí kanál AI0 vždy představuje vstup zesilovače a kanál AI1 je vždy připojen na výstup. Vždy se vzorkuje vstupní a výstupní signál. Výpočet amplitudové frekvenční charakteristiky vychází z poměru amplitud vstupního a výstupního signálu. Výpočet fázové frekvenční charakteristiky je prováděn tak, že se signály vzorkované na vstupu a na výstupu zarovnají tak, že vstupní signál má fázový posun nula, a druhý se zarovná o stejný počet vzorků. Pomocí FFT je vypočítáno fázové spektrum obou signálů a určí se počáteční jejich fáze. Numerickým odečtením obou hodnot získáme fázový posun pro danou frekvenci. Co se týče měření harmonického zkreslení THD a harmonického zkreslení plus šum THD+N, ty jsou pomocí knihovních funkcí v LabVIEW počítány pro každou frekvenci.



Obr. 34 – Zjednodušené blokové schéma pro měření amplitudové a fázové char. a zkreslení výkonových zesilovačů

- Místo voltmetrů jsou na měřící body připojeny vstupní svorky analogových kanálů měřící karty NI PCI 4472. Měřící kanál AI0 vždy představuje vstup zesilovače (výstup generátoru) a kanál AI1 je vždy připojen na vhodnou odbočku napěťového děliče na výstupu zesilovače.
- Generátor je ovládán z LabVIEW přes komunikační vrstvu VISA. Výstupem je signál sinus o předem zvolených frekvencích, amplituda je nastavena na hodnotu pro lineární režim.
- V každém cyklu programu jsou navzorkována data na vstupu a výstupu zesilovače a vypočítají se žádané parametry (zesílení, fázový posun, THD, THD+N).



Obr. 35 – Čelní panel aplikace pro měření amplitudové char., fázové char., THD a THD+N

Hlavním spouštěcím souborem je *main_main_amplitudova_fazova.vi*.

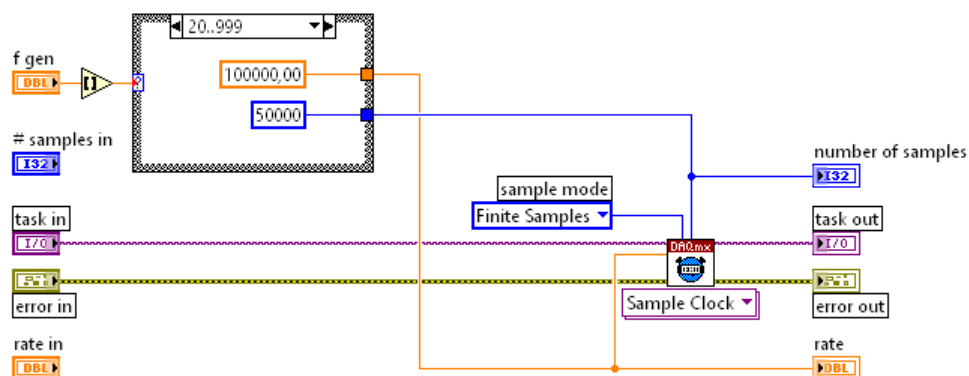
Tato aplikace je nejkomplexnější, neboť je určena k měření frekvenčně závislých vlastností. Program postupně mění frekvenci signálu sinus na generátoru a měří amplitudově frekvenční charakteristiku, fázově frekvenční charakteristiku a také míru harmonického zkreslení THD a harmonické zkreslení plus šum THD+N.

Uživatel program parametruje tím, že vybere rozsah frekvencí, ve kterém se měří (k výběru jsou intervaly 1 Hz až 200 kHz), dále měřicí kartu a dobu ustálení generátoru. Je třeba zadat napětí pro generátor tak, aby zesilovač pracoval v lineárním režimu – viz program pro měření lineárního režimu v Kap. 13.2.

K měření jsou k dispozici dvě měřicí karty, přičemž NI PCI 4472 může být použita v rozsahu 1 Hz až 20 kHz (horní limit je dán maximální vzorkovací frekvencí 100 kS/s). Nyquistův teorém sice teoreticky umožňuje měření až do 50 kHz, ale pouze v idealizovaném případě, že signál neobsahuje žádné vyšší harmonické. Výpočty THD by pak taktéž nebyly správné.

Při prvním běhu smyčky WHILE, která obsahuje celkem 8 oken FLAT SEQUENCE, se změří hodnoty pro frekvenci signálu sinus 1 kHz. Tyto hodnoty se uloží jako referenční a pro ty je udáván pokles zesílení au v decibelech. Spodní hranice je určena jako pokles o 3 dB.

Pro vzorkování různých frekvencí jsou voleny různé vzorkovací frekvence měřicí karty. Nastavení závisí na měřené frekvenci signálu a na použité kartě.



Obr. 36 – Nastavení časového okna pro měření

Samotné měření je podobné jako u předchozích programů, například zajištění celistvého počtu period. Většinu výpočtů provádí subVI *mereni_velicin.vi*. Je určeno zesílení, maximální hodnota napětí, efektivní hodnota napětí, zkreslení THD a THD+N, a poté pomocí *FFT_spektrum.vi* fáze signálu.

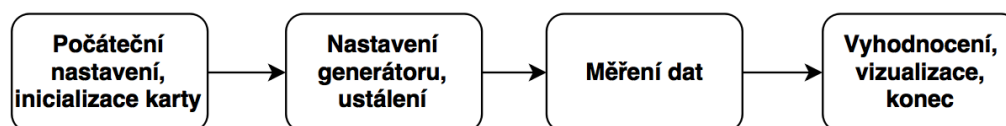
Samotné určení fáze předpokládá správný počet period (zajištěno prostřednictvím *hled_nulyX.vi*). Určení fáze signálu probíhá tak, že se navzorkovaný signál zpracuje funkcí *FFT Spectrum (Mag Phase).vi*, která vypočítá amplitudové spektrum signálu. Jelikož je pro funkci zvolena obdélníková okenní funkce, je předchozí krok, zajištění celistvého počtu period, kriticky důležitý. Při nedodržení této podmínky by se v amplitudovém spektru objevily neexistující spektrální složky. Funkce počítá amplitudové a fázové spektrum a pomocí výpočtu aktuální položky v poli (výpočet vychází z požadované frekvence a hodnot f_0 a df) je určena počáteční fáze a amplituda hledané frekvence. Následně je aplikován algoritmus pro rozbalení fáze, který zajistí, že se výsledná fáze bude pohybovat v rozsahu $\pm 180^\circ$. Samotný fázový posun je vypočítán odečtením počáteční fáze vstupu a výstupu zesilovače.

V druhém, a každém dalším běhu smyčky WHILE jsou nastaveny hodnoty frekvence ze zvoleného pole frekvencí. Naměřené hodnoty se okamžitě vykreslují do grafů a ukládají do polí.

Následuje vyhodnocení, zdali není zesílení pro aktuálně měřenou frekvenci nižší než -3 dB, jestliže ano, zaznamená se minimální, nebo maximální efektivní frekvence. Až jsou z pole frekvencí proměřeny všechny prvky, cyklus se ukončí a na čelním panelu se vykreslí výsledky. V případě kladné volby jsou výsledky uloženy do souboru.

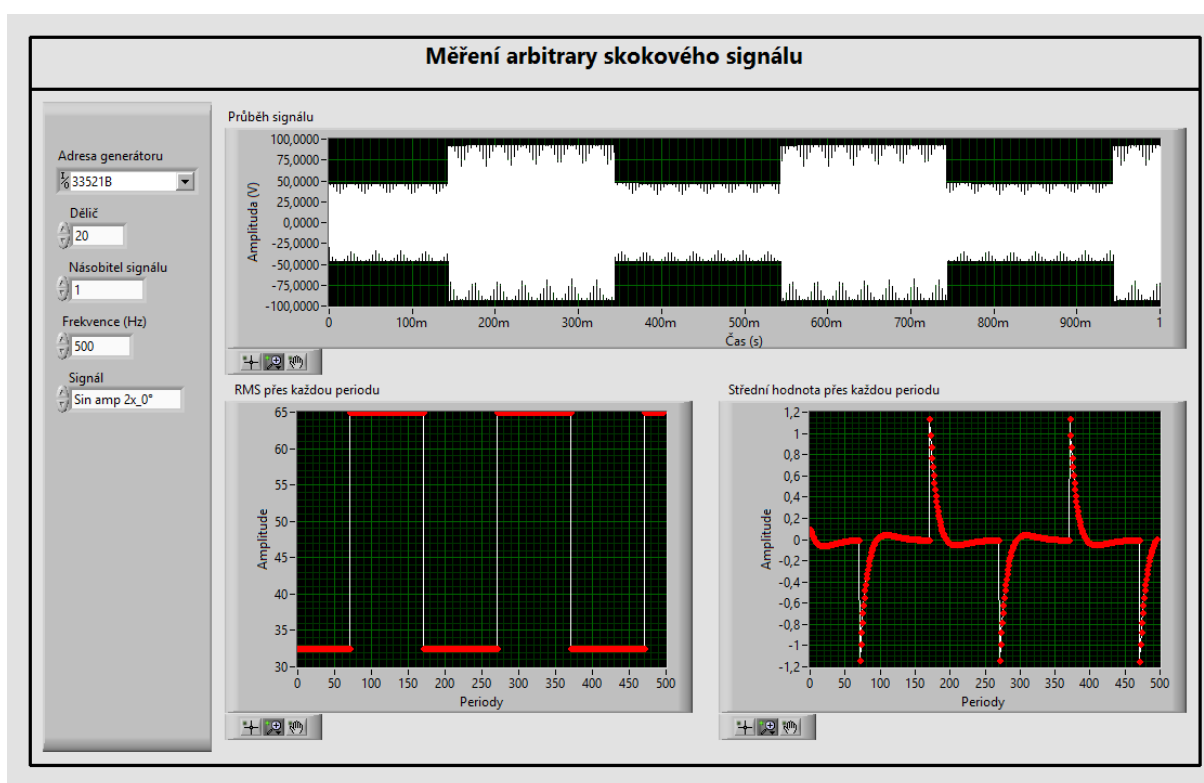
13.6 Popis algoritmu pro sledování reakce na skokovou změnu amplitudy

Schéma zapojení je totožné se schématem pro měření rychlosti přeběhu (Obr. 31).



Obr. 37 – Zjednodušené blokové schéma programu pro sledování reakce na skokovou změnu amplitudy

- Místo voltmetru je na vhodnou odbočku napěťového děliče na výstupu zesilovače připojen kanál AI1 karty NI PCI 4472.
- Generátor je ovládán z LabVIEW přes komunikační vrstvu VISA. Výstupem je zvolený signál sinus s dvojnásobným skokem amplitudy v různých fázích průběhu (0° , $+90^\circ$, -90° , nebo 180°).
- Program se provede pouze jednou, zesilovač je buzen zvoleným signálem, měřicí kartou jsou navzorkována data a následně jsou vyhodnoceny efektivní a střední hodnota výstupního signálu pro každou periodu.



Obr. 38 – Čelní panel aplikace pro sledování reakce na skokovou změnu amplitudy

Hlavním spouštěcím souborem je *main_arbitrary.vi*.

Někdy je důležité znát chování zesilovače při skokové změně amplitudy sinusového signálu. V principu každý zesilovač v takové situaci vykáže nějakou míru stejnosměrného posunutí. Některé

zesilovače střední hodnotu srovnají rychleji, některé pomaleji. Tento program slouží ke sledování průběhu a vyhodnocuje RMS a střední hodnotu v každé periodě.

Program se vykonává dle blokového diagramu tak, že se do generátoru nahraje požadovaný průběh, ten se změní a vyhodnotí.

Vyhodnocení veličin pro každou periodu je provedeno v subVI *hledani_periody.vi*. Počet měřených period se počítá z časového okna a měřené frekvence signálu. V cyklu FOR se prochází všechna naměřená data a hledají se kladné průchody nulou. Z pole indexů se odstraní krajní prvky a pak se v další smyčce FOR postupně prochází naměřená data a vhodným posunem indexu se počítá RMS a střední hodnota v každé periodě signálu. Výsledkem jsou dvě pole, která se vykreslí do grafů na čelním panelu.

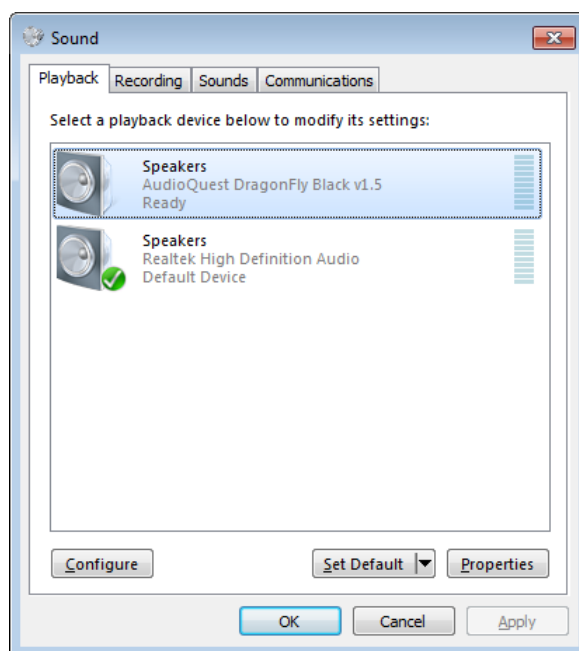
14 Popis programů pro měření DAC převodníků a výstupních karet NI

Programy pro měření DAC převodníků a karet NI s analogovými výstupy jsou velice podobné programům pro měření výkonových zesilovačů. Proto zde budou popsány hlavně odlišnosti od měření koncových stupňů, namísto podrobného popisování stejných částí kódu. Jednou z nejmarkantnějších změn je skutečnost, že ke generování signálu na DAC převodník je nutno přistupovat jinak, než při ovládání signálového generátoru. Jedná se o nutnost periodicky posílat data na výstup DAC převodníku (oproti nastavení určité hodnoty na generátor).

14.1 Prvotní nastavení DAC převodníků

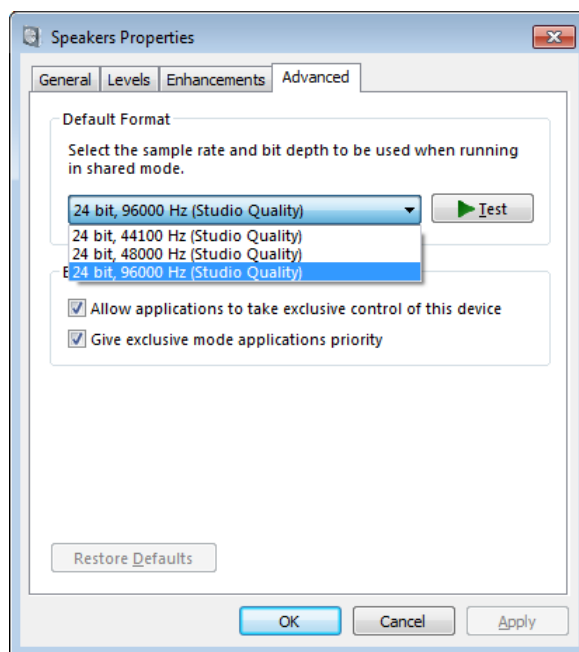
14.1.1 Nastavení převodníku DragonFly ve Windows

Po připojení k portu USB se na převodníku rozsvítí červená LED. To znamená, že je zařízení ve stavu standby. Pro nastavení nejvyšší vzorkovací frekvence je nutné toto zařízení ve Windows nastavit. Postup je následující: *Start – Control Panel – Sound*.



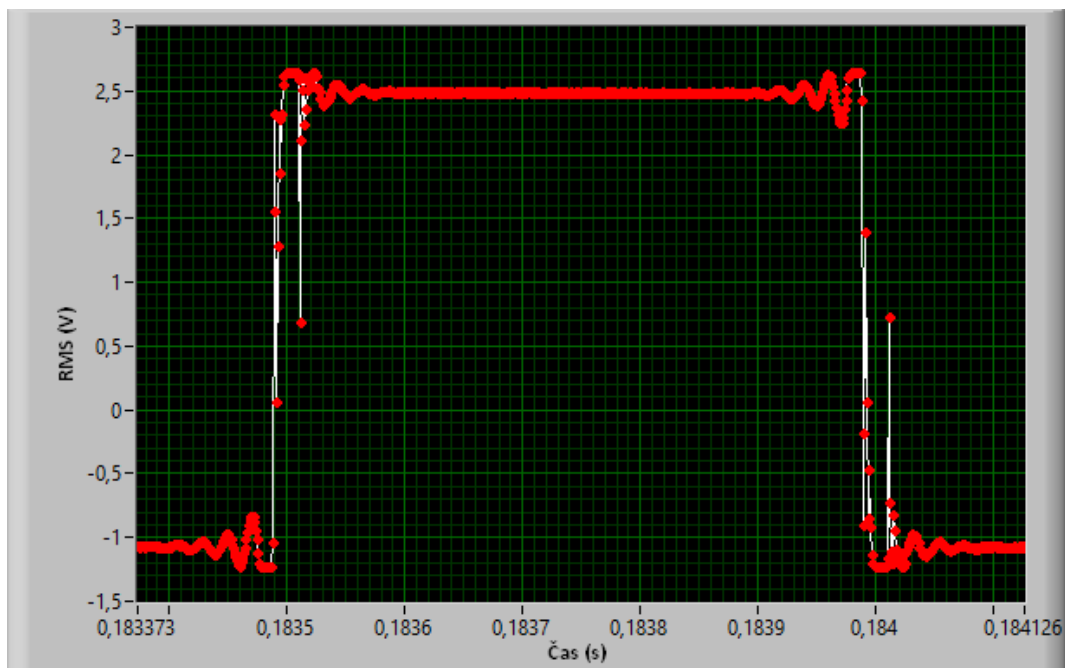
Obr. 39 – Výběr DAC převodníku

Zde jsou zobrazeny všechny dostupné zařízení pro přehrávání zvuku. Je třeba vybrat položku s názvem *AudioQuest DragonFly Black v1.5* a otevřít nastavení možností *Properties*. Vzhledem k požadavkům je třeba v záložce *Enhancements* zaškrtnout: *Disable all enhancements* a v záložce *Advanced* vybrat položku *24 bit, 96000 Hz*. Po zvolení by se na převodníku měla rozsvítit dioda v růžové barvě. Tím je zajištěna nejvyšší vzorkovací rychlost. Tento postup je společný pro všechny DAC převodníky.



Obr. 40 – Nastavení vzorkovací frekvence DAC převodníku

Správné nastavení vzorkovací frekvence DAC převodníku je velice důležité. Pokud by byla nastavena nižší frekvence, než převodník umožňuje, sníží se maximální rychlost vzorkování a převodník dokáže generovat nižší frekvenci signálu. Pokud by byla nastavena vyšší vzorkovací frekvence, převodník se může začít chovat nekorektně. Příkladem je průběh generovaného obdélníkového signálu na integrovaném DAC v PC (Obr. 41). Vzorkovací frekvence byla nastavena na 96 kHz místo požadovaných 48 kHz.



Obr. 41 – Generování obdélníkového signálu při špatně zvolené vzorkovací frekvenci

14.1.2 Nastavení FiiO X3 2nd.

Tento převodník je primárně určen pro přehrávání skladeb k mikroSD karty. Po připojení k PC pomocí mikroUSB kabelu je možné jej využívat jako externí DAC. Předtím je nutné nainstalovat ovladače, které jsou dostupné na stránkách výrobce. [9] Do té doby nebude převodník rozpoznatelný pro Windows.

Zvláštností, kterou jsem zjistil z fóra na stránkách výrobce, a kterou mi později potvrdila technická podpora FiiO X3 je, že tento převodník se v režimu externího DAC přepne z rozlišení 24 bit do rozlišení 16 bit. Je to způsobeno využíváním sdílených prostředků tohoto převodníku. Tato skutečnost není v běžném popisu uváděna a při provozu zařízení je na displeji stále zobrazeno: 192 kHz/24 bit.

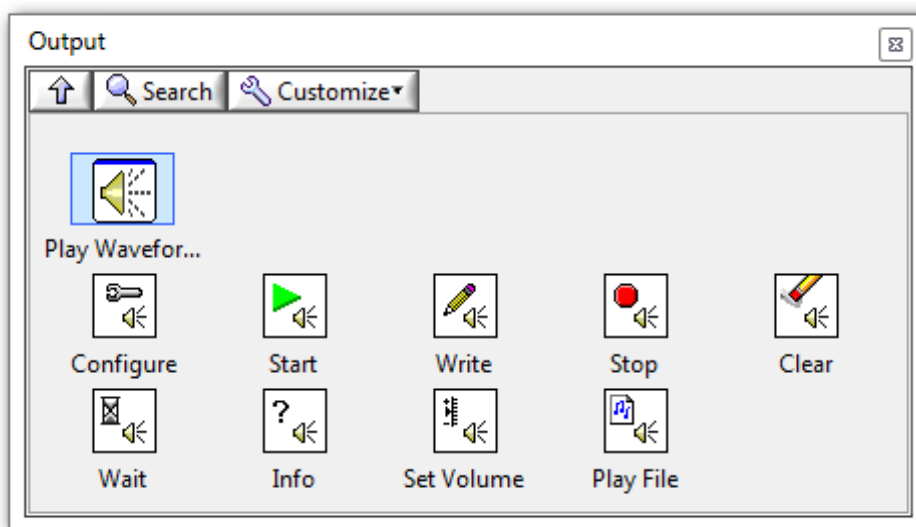
14.1.3 Nastavení ostatních převodníků

Nastavení vzorkovací frekvence a zakázání zvukových efektů platí obecně pro všechny převodníky. Převodník Axagon HQ je schopen podobně jako DragonFly indikovat nastavenou vzorkovací frekvenci třemi diodami. Maximální vzorkovací frekvence je 96 kHz.

14.2 Přístup LabVIEW k DAC převodníkům

V zásadě je nutné při obsluze analogového výstupu rozlišit, zda se jedná o NI kartu s AO nebo o DAC převodník podporovaný v OS Windows jako zvuková karta.

LabVIEW má pro operace se zvukovými kartami několik knihoven. Je možné pracovat s audio soubory, dále snímat zvuk mikrofonom a konečně pracovat se zvukovou kartou. Knihovni funkce, umožňující tyto akce je možné nalézt v paletě Functions – Programming – Graphics & Sound – Sound – Output.



Obr. 42 – Funkce pro práci s DAC převodníky v LabVIEW

Kromě expresního VI jsou k dispozici funkce pro:

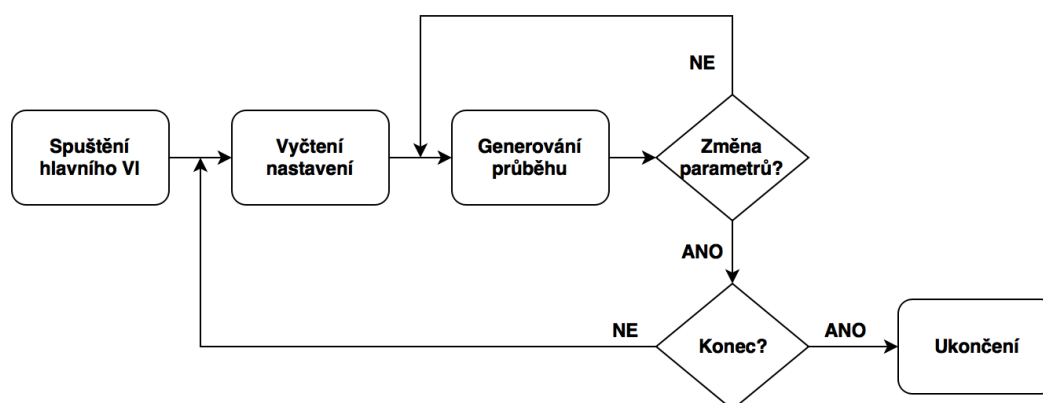
- Konfiguraci výstupního zařízení – zde se nastavuje především:
 - velikost bufferu (pro kontinuální přehrávání je vhodná větší hodnota),
 - zvukový formát ve tvaru: vzorkovací rychlost (běžná je 44,100 S/s), počet kanálů a rozlišení v bitech (běžně 16 bit),
- Zápis dat na zvukové zařízení – vstupem je pole hodnot ke generování,
- Nastavení hlasitosti (nesouvisí s hlasitostí ve Windows) – v rozmezí 0 až 100 %,
- Přehrávání zvukového souboru z disku,
- Čekání na přehrávání všech dat z bufferu, nastavuje se hodnota v sekundách,
- Ukončení operací se zvukovou kartou a vyčištění bufferu,
- Další funkce.

Pro nejpreciznější generovaný signál je zapotřebí, aby byla navolena nejvyšší vzorkovací rychlost, kterou DAC převodník zvládne a nejvyšší bitová hloubka. Co se týče nastavení úrovně signálu, ve

Windows se ručně nastaví % hlasitosti a veškeré programové úpravy amplitudy se budou konat přes funkci *Sound Output Set Volume.vi*.

DragonFly navíc dle výrobce obsahuje 64 krokové analogové ovládání hlasitosti. Tímto by mělo být dosaženo udržení kvality zvuku i při nižších úrovních výstupního signálu, neboť by nemělo docházet k využívání nízkého rozsahu DAC převodníku. Tuto vlastnost bude možné ověřit průběhem THD při postupném zvyšování hlasitosti od velmi nízkých hodnot.

14.3 Popis generování signálu na DAC převodníku



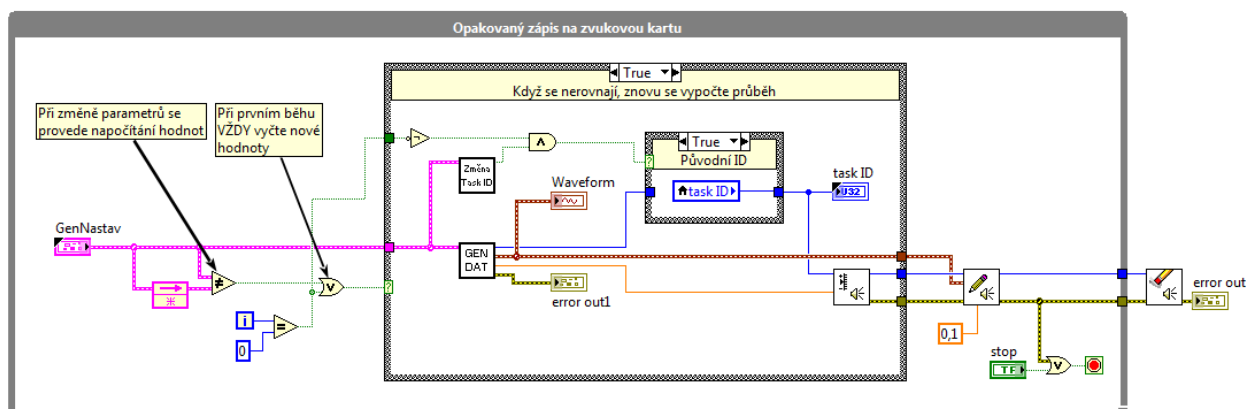
Obr. 43 – Zjednodušené blokové schéma generátoru zvuku na DAC

Způsob generování signálu zvukovou kartou je odlišný, než při nastavování signálu na generátoru Agilent. Pro generování signálu je zapotřebí neustále občerstvovat data v bufferu pro zápis dat. Aby nebylo zapotřebí mít v programech nezávislou smyčku WHILE, rozhodl jsem se vytvořit program tak, aby bylo ovládání podobné, jako komunikace s generátorem Agilent přes VISA. Jádrem programu je nezávislé VI, které je spouštěno a ovládáno přes systém referencí. Tímto způsobem se vždy toto VI spustí a předají se nastavené parametry. Ovládání v nadřazené aplikaci vypadá tak, že se nejprve inicializuje převodník. To se provede tak, že se zavolá subVI *gen_1.vi*. V něm se načte VI s názvem *Generátor_zvukuV2.vi* a pomocí referencí se načte čelní panel a vyčtou se potřebné Controly. Jmenovitě se jedná o cluster s nastavením a boolean Stop pro vzdálené zastavení generování.

V druhém kroku se z nadřazené aplikace pomocí subVI *gen2.vi* pošlou dle potřeb programu nastavené hodnoty, jako *Vzorkovací rychlost*, *počet kanálů*, *rozlišení*, *identifikační číslo zařízení* a *úroveň výstupního napětí*. Toto VI data pomocí referencí pošle do *Generátor_zvukuV2.vi* pouze v případě změny některého z parametrů.

Generátor_zvukuV2.vi funguje tak, že poprvé a v případě změny parametrů vždy vygeneruje požadovaná data a pak spustí generování dat na zvukovou kartu. SubVI *změna_TaskID.vi* je nutná proto, aby nedocházelo k chybám při změně některých parametrů. Pokud dojde ke změně tvaru nebo

velikosti požadovaného signálu, ponechá se původní nastavení tasku. V opačném případě (např. změna vzorkovací frekvence) se musí vygenerovat nový task.



Obr. 44 – Ukázka vzdáleně volaného ovládání DAC

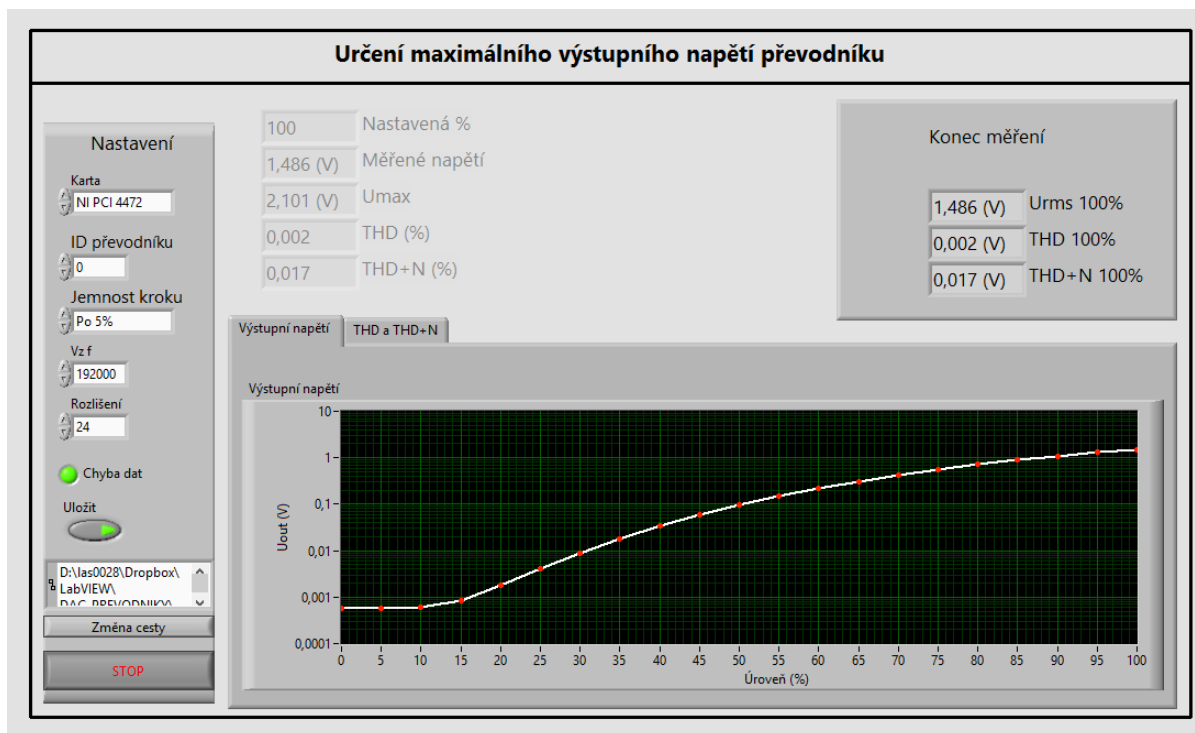
O vytvoření průběhu dat pro zápis se stará *gen_dat.vi*. Nastavení, přenesené clusterem GenNastav jsou použita k nastavení zařízení a generování průběhu. Průběh signálu je generován jen jednou a je cyklicky zapisován na výstup zvukové karty. Proto je nezbytné zajistit, aby na sebe začátky a konce dat navazovaly. To je zajištěno volbou parametrů při generování. Vždy je vygenerována 1 sekunda průběhu signálu a poslední hodnota signálu vždy končí v nule tak, aby na ni vhodně navazoval nový balík dat. V průběhu se tak nebudou vyskytovat nespojitosti při opakovaném generování dat.

Pro kontinuální generování dat je v manuálu LabVIEW doporučeno volit větší buffer. Velikost bufferu je navolena na přibližně 200 ms. To je důvodem, proč nejsou reakce generování na změnu parametrů okamžité. Vždy se musí reprodukovat všechna připravená data, až pak je možné generování ukončit. Z tohoto důvodu byla zvolena velikost bufferu.

Program pro generování je vytvořen v několika drobných modifikacích. Jednou z nich je možnost volby několika průběhů, např. pro generování DC signálu, nebo obdélníkového průběhu.

14.4 Popis programu pro měření výstupu v závislosti na výstupní úrovni

14.4.1 Měření DAC převodníků



Obr. 45 – Čelní panel aplikace měření výstupu v závislosti na výstupní úrovni

Hlavním spouštěcím souborem je *main_lin_DAC.vi*.

Tento program vychází z měření lineárního režimu (Kap. 13.2), jen se nepředpokládá přebuzení převodníku ani při dosažení 100 % úrovně výstupního signálu.

Při každém běhu smyčky WHILE se zvýší amplituda generovaného sinusového signálu od 0 % až po 100 %. Volba kroku umožňuje udát jemnost kroku 1 %, 5 % nebo 10 %. Pro každou výstupní úroveň je změřena výstupní amplituda a vypočítáno zkreslení THD a THD+N. Do grafu se postupně vykresluje výstupní úroveň ve voltech, neboť není možné počítat zesílení.

14.4.2 Měření karet NI s analogovým výstupem

Hlavním spouštěcím souborem je *main_lin_KARTY.vi*.

Ovládání napětí na kartě je podobné jako u signálového generátoru. Uživatel zvolí, v jakém rozsahu napětí má být karta proměřena a podle toho se nastavuje výstupní napětí.

14.5 Popis programu pro měření výstupního napětí a zkreslení

Hlavním spouštěcím souborem je *main_amplitudova_DAC.vi*.

Program vychází z měření amplitudové charakteristiky (Kap. 13.5) s tím rozdílem, že místo průběhu zesílení na frekvenci se do grafu vykresluje průběh efektivní hodnoty výstupního napětí. Když výstupní amplituda oproti frekvenci 1 kHz poklesne o více než $1/3$, je vyhodnocena minimální nebo maximální efektivní frekvence.

Program pro měření těchto hodnot karet NI s analogovými výstupy je podobný a hlavní spouštěcí soubor je *main_amplitudova_KARTY*.

14.6 Popis programu pro měření rychlosti přeběhu

Hlavním spouštěcím souborem je *main_rychlost_prebehu_DAC.vi*.

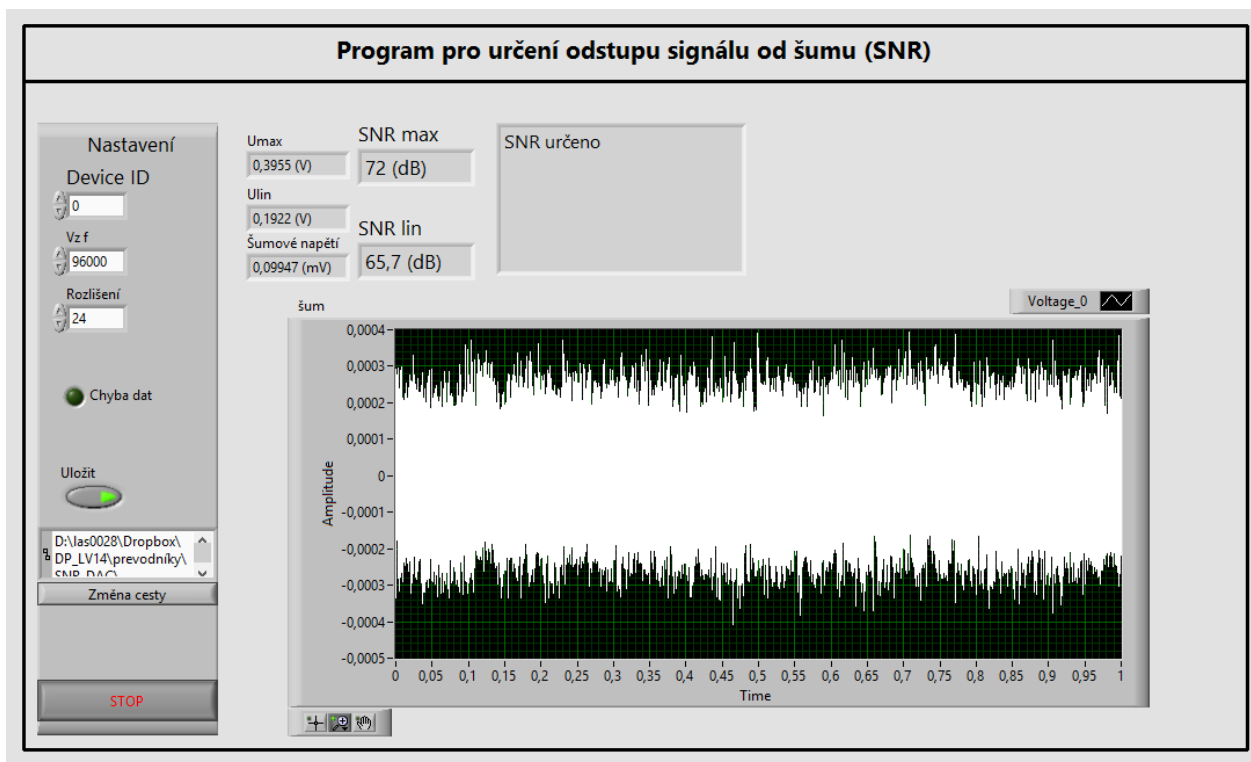
Mimo odlišnost ovládání DAC převodníku zde není rozdíl oproti měření rychlosti přeběhu u výkonových zesilovačů (Kap. 13.4).

Spouštěcí soubor pro měření NI karet je označen *main_rychlost_prebehu_KARTY*.

14.7 Popis programu pro měření SNR u DAC převodníků

Hlavním spouštěcím souborem je *main_rychlost_prebehu_DAC.vi*.

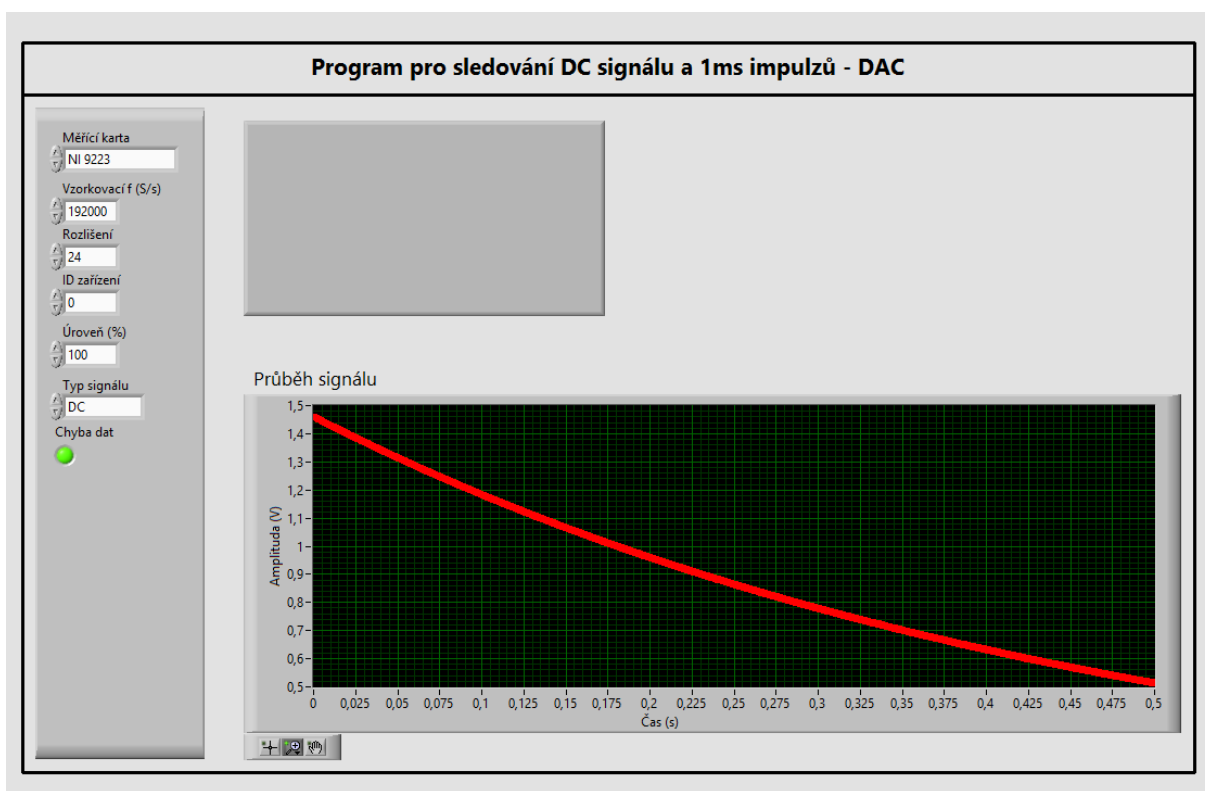
Mimo odlišnost ovládání DAC převodníku zde není rozdíl oproti měření SNR u výkonových zesilovačů (Kap. 13.3).



Obr. 46 – Čelní panel aplikace měření SNR

Spouštěcí soubor pro měření NI karet je označen *main_SNR_KARTY*.

14.8 Měření DC signálu



Obr. 47 – Čelní panel aplikace pro sledování reakce na DC signál DAC převodníku

Je velmi užitečné vědět, jak se DAC převodníky chovají při požadavku na generování DC signálu. Některé převodníky obsahují mechanismy pro potlačení DC složky kvůli možnému poškození navazujícího audiořetězce.

Následující program má za úkol na DAC převodníku generovat DC signál a změřit jej. Při měření kartou NI 9223 bude doba měření signálu 500 ms. Průběh signálu je zobrazen v grafu na čelním panelu. Tímto způsobem je možné sledovat reakci DAC převodníku na DC signál.

Hlavní spouštěcí program pro DAC převodníky je *main_DC* a pro karty NI *main_KARTY*. U analogových výstupů karet NI se ovšem schopnost generovat DC signál očekává.

15 Naměřené výsledky

Naměřených výsledků pro výkonové zesilovače i DAC převodníky a DAQ karty je poměrně velké množství. Kdyby byly všechny výsledky uvedeny v této části práce, stala by se zbytečně dlouhou a nepřehlednou.

Z důvodů přehlednosti je zde uvedena tabulka pro srovnání výsledků porovnatelných parametrů zařízení mezi sebou a poté několik důležitých průběhů ve formě grafů. Všechny naměřené výsledky jsou dostupné v elektronických přílohách.

15.1 Výsledky pro výkonové zesilovače

Nejprve je zde uvedena tabulka (Tab. 6), ve které jsou přehledně porovnány všechny jednoduše porovnatelné parametry výkonových zesilovačů.

Tab. 6 – Výsledky výkonových zesilovačů pro srovnání

Měřené parametry	Harman Kardon 1.3	AE Techron 7224	DAP 1500
Vstupní citlivost (V efektivní)	1,28	6,48	1,44
Maximální ef. napětí (V)	35,81	124,45	73,95
Zesílení (dB)	28,96	25,67	34,24
Fázový posuv pro 1kHz (°)	0,134	0,331	1,705
Minimální ef. frekvence (Hz)	1	1	8
Maximální ef. frekvence (Hz)	200.000	200.000	20.000
SNR (dB)	85,78	98,19	93,56
Šumové napětí (mV)	1,84	1,53	1,55
THD pro 1kHz (%)	0,011	0,008	0,008
THD+N pro 1kHz (%)	0,041	0,015	0,013
Doba náběhu (us)	0,678	4,609	11,31
Rychlost přeběhu (V/us)	150,48	76,44	15,61

15.1.1 Porovnání koncových stupňů mezi sebou

Zesilovače Harman Kardon 1.3 a DAP 1500 byly před hranicí limitace výstupního signálu buzeny napětím 1,28 V a 1,44V. AE Techron je možné budit napětím až 6,48 V efektivních, což je přibližně 0,8 V pod hranicí amplitudy 10V maximální.

Z Tab. 6 je patrné, že nejvyšší napětí na výstupu je schopen poskytnout AE Techron ($U = 124,45 \text{ V}$). Fázový posuv má nejnižší Harman Kardon ($0,134^\circ$). Zesilovače Harman Kardon a AE Techron pracují v rozsahu 1 Hz až 200 kHz, DAP 1500 pracuje místo výrobcem uváděných 20 Hz – 20 kHz v širším pásmu už od 8 Hz až po 20 kHz.

Nejllepší odstup signál od šumu má AE Techron s výsledkem přes 98 dB, tento výsledek je dán vysokým výstupním napětím a velice nízkým šumovým napětím (jen 1,53 mV). Harmonické zkreslení THD mají všechny tři zesilovače velice nízké, okolo 0,01 %, což je dobrý výsledek. Co se týče THD+N jsou výsledky AE Techronu a DAP 1500 velice podobné (0,015 %), o něco horší je Harman Kardon (0,04 %).

Výsledky měření rychlosti přeběhu jsou poněkud překvapivé. AE Techron prokázal rychlost přeběhu, udávanou v katalogovém listu (76,44 V/us), oproti tomu DAP 1500 měl poněkud slabý výsledek (jen 15,61 V/us). Tato hodnota je dána dlouhou dobou náběhu (11,31 us), která ovšem vyplývá z frekvenčního pásma do 20 kHz. Velice dobrým výsledkem se prokázal Harman Kardon, jehož rychlost přeběhu je přes 150 V/us. Tento koncový stupeň sice dodává nejnižší výstupní napětí (35,81 Vrms), ale svou velice krátkou dobou náběhu (0,68 us) dojde k tak vysokému výsledku rychlosti přeběhu.

15.1.2 Porovnání koncových stupňů s katalogovými hodnotami

V tomto porovnání je jen několik údajů, které výrobci k zesilovačům uvádějí.

Tab. 7 – Porovnání koncových stupňů s katalogovými hodnotami

Měřené parametry	Harman Kardon 1.3		AE Techron 7224		DAP 1500	
	Katalog	Ověřeno	Katalog	Ověřeno	Katalog	Ověřeno
Vstupní citlivost	-	-	$\pm 10 \text{ V}$	✗	1,55 V	✗
Minimální ef. frekvence (Hz)	5	✓	DC	✓	20	✓
Maximální ef. frekvence (Hz)	160k	✓	60 kHz (300 kHz)	✓	20 kHz	✓
SNR (dB)	115	✗	100	✓	>100	✗
THD 1kHz (%)	<0,08	✓	<0,1	✓	<0,05	✓
Fázový posun ($^\circ$)	-	-	$\pm 5^\circ$	✓	-	-
Rychlost přeběhu (V/us)	-	-	75	-	-	-

Vstupní citlivost byla pro AE Techron 7442 i DAP 1500 trochu nižší než udává výrobce, ale vzhledem k malému rozdílu a chybě měřicí metody, která je dána nastaveným krokem testeru jsou naměřené výsledky shodné s těmi, které uvádí výrobci.

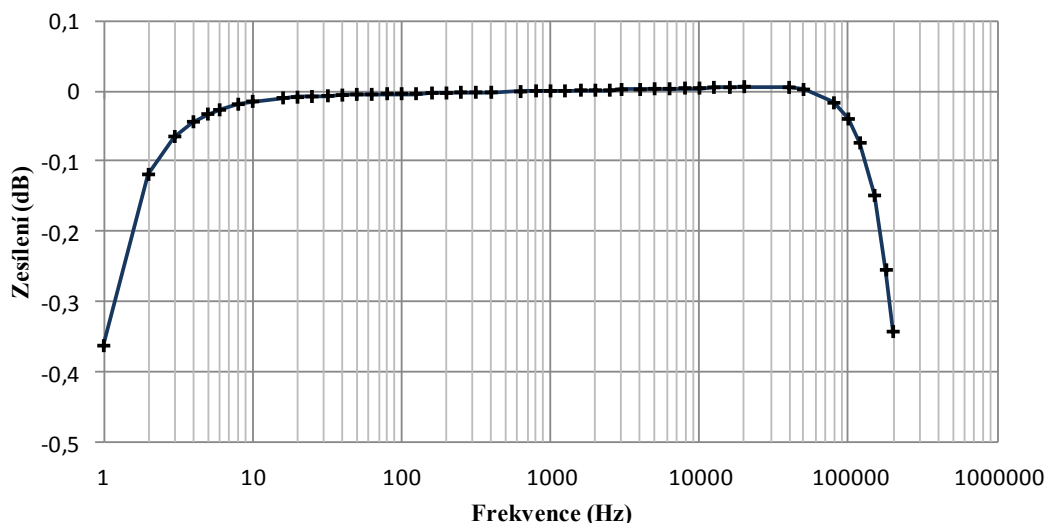
Výsledek je takový, že co se týče dynamických vlastností, zesilovače katalogové hodnoty splnily. Dokonce i míra harmonického zkreslení byla dodržena (i když DAP se při výstupní frekvenci 20 kHz limitní hodnotě THD velice přiblížil, viz Obr. 56).

Jediný zesilovač, pro který je z katalogového listu výrobce dostupný parametr fázový posun je AE Techron, a hodnota má být $\pm 5^\circ$ v rozmezí frekvencí 10 Hz až 10 kHz. Z Obr. 52 je patrné, že udávaný fázový posuv je splněn až do frekvence 12,5 kHz. Od frekvence 20 kHz začíná fázový posun mezi vstupním a výstupním signálem prudce růst.

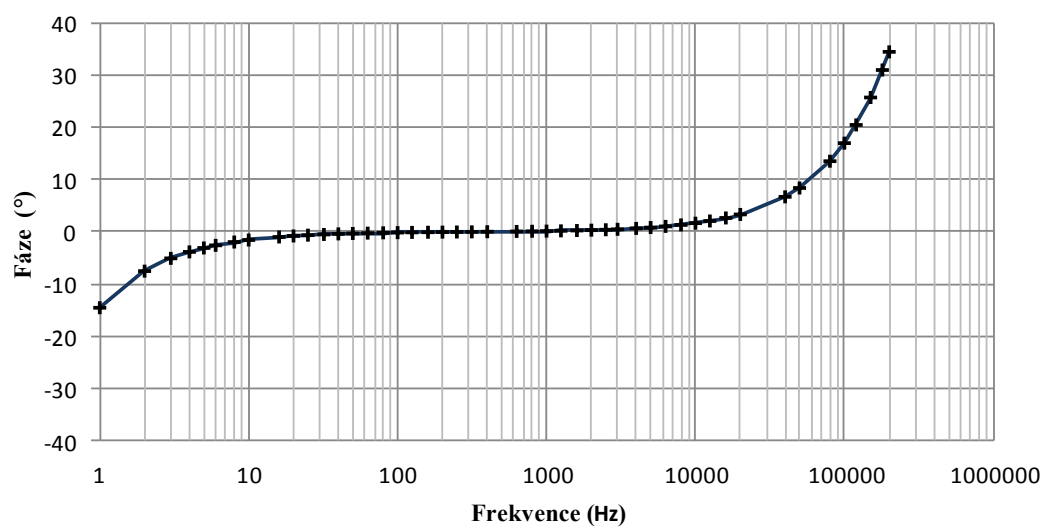
Parametr, který ovšem splnil pouze jeden zesilovač je odstup signál šum. Zesilovač AE Techron 7224 se k deklarované hodnotě velice přiblížil (více než 98 dB namísto 100 dB). Vzhledem k možné nejistotě měření a k malému rozdílu hodnou jsou tyto výsledky shodné. Odstup signál – šum je u DAP 1500 s trochu horším výsledkem také vysoký (93,6 dB místo 100 dB).

Zde je nutno podotknout, že norma pro toto měření umožňuje celkem tři možnosti zapojení viz Kap. 10.5. První je odpojení vstupních svorek, druhé je zkratování vstupních svorek proti zemi a třetí je připojení mezi vstupní svorky rezistor s předpokládaným odporem výstupní impedance připojovaného zařízení. Je možné, že zesilovače byly pro SNR měřeny při jiném zapojení, než bylo provedeno testerem (odpojení vstupních svorek).

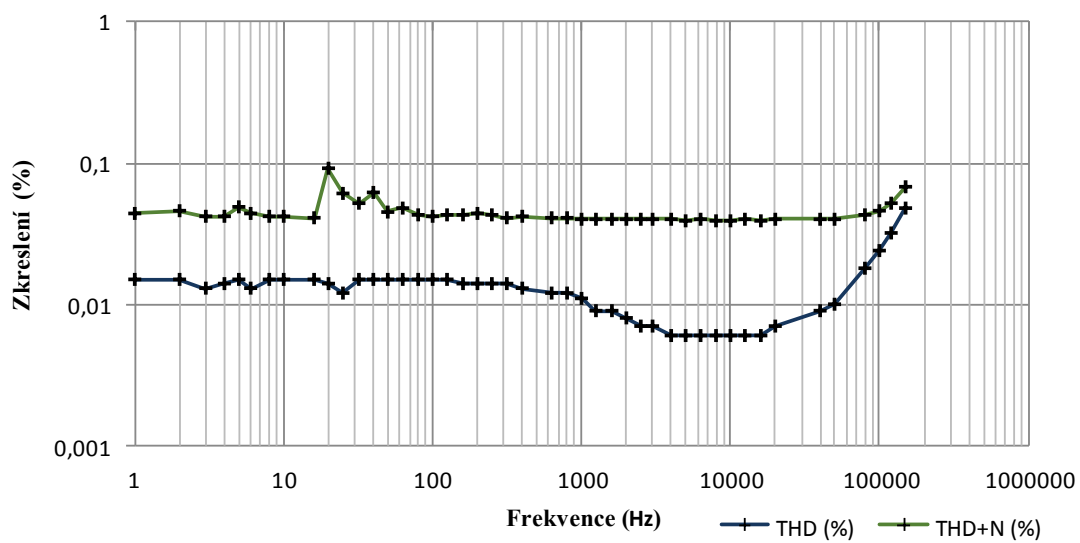
15.1.3 Naměřené výsledky pro Harman Kardon Signature 1.3



Obr. 48 – Modulová charakteristika Harman Kardon 1.3

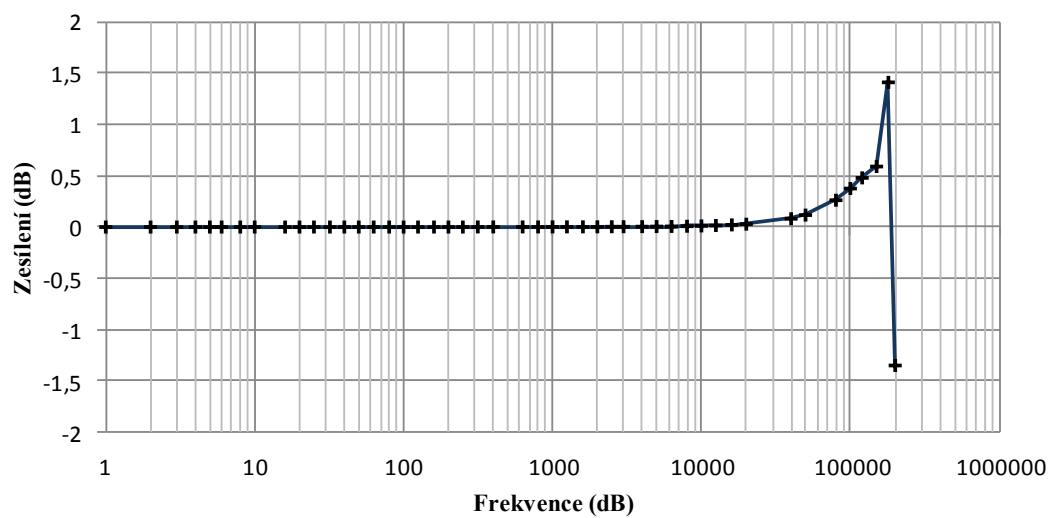


Obr. 49 – Fázová charakteristika Harman Kardon 1.3

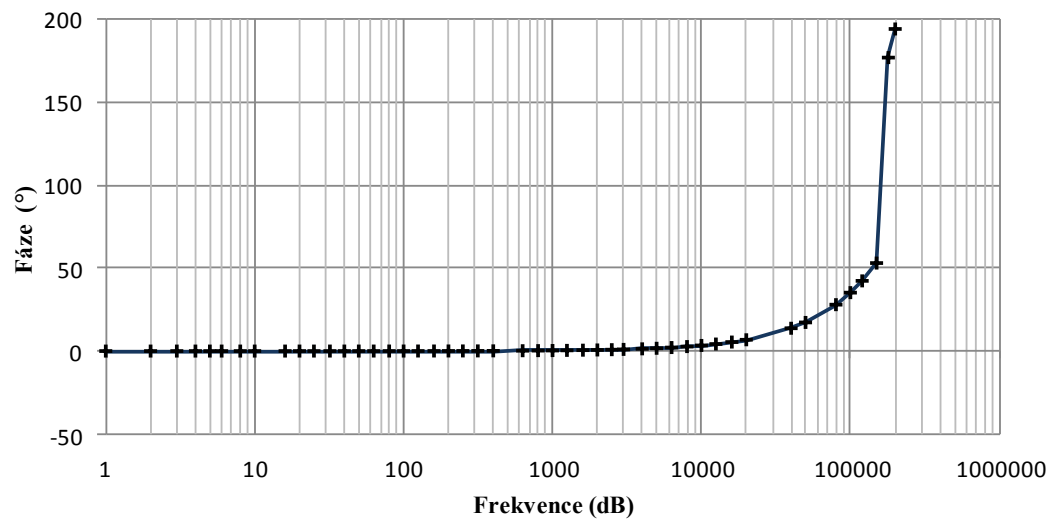


Obr. 50 – Průběh THD a THD+N - Harman Kardon 1.3

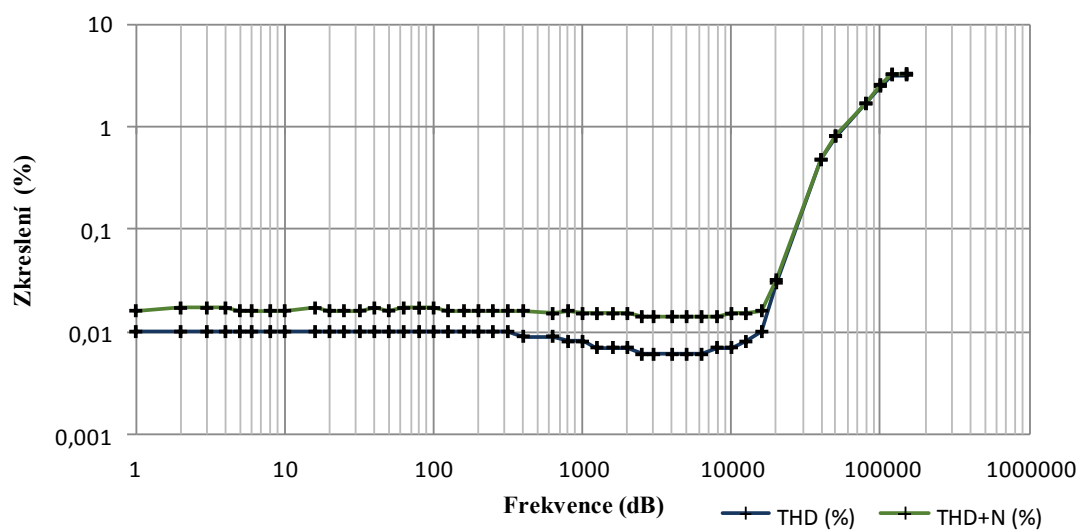
15.1.1 Naměřené výsledky pro AE Techron 7224



Obr. 51 – Modulová charakteristika AE Techron 7224

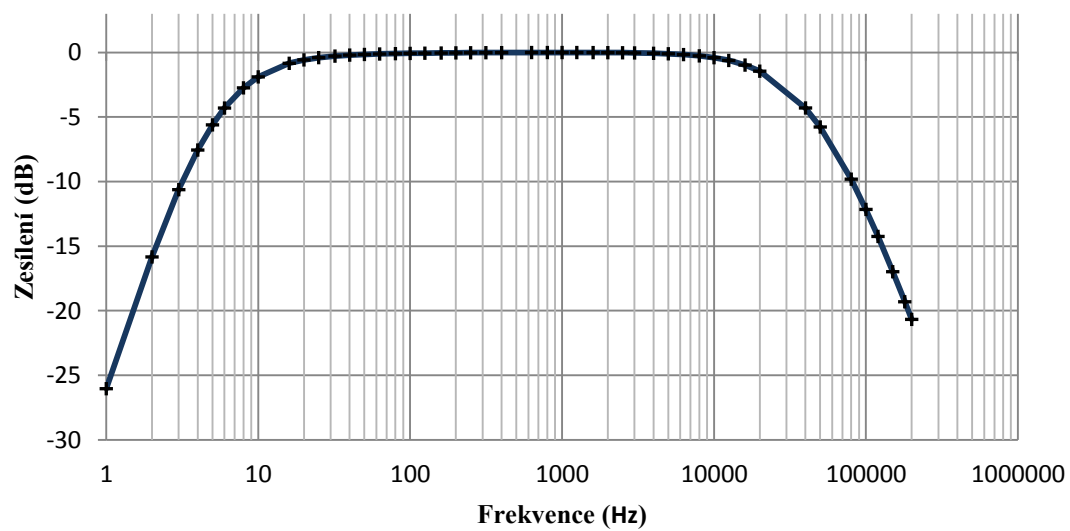


Obr. 52 – Fázová charakteristika AE Techron 7224

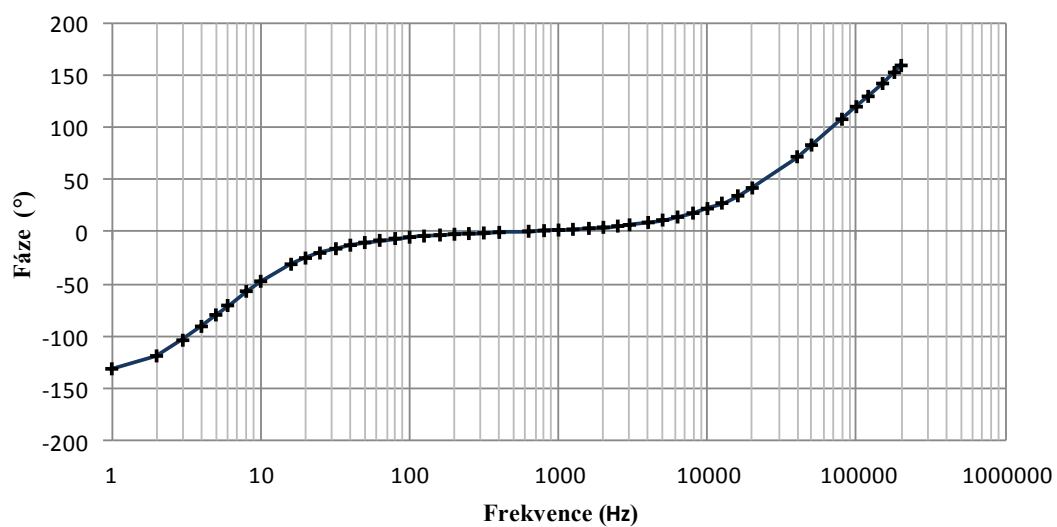


Obr. 53 – Průběh THD a THD+N - AE Techron 7224

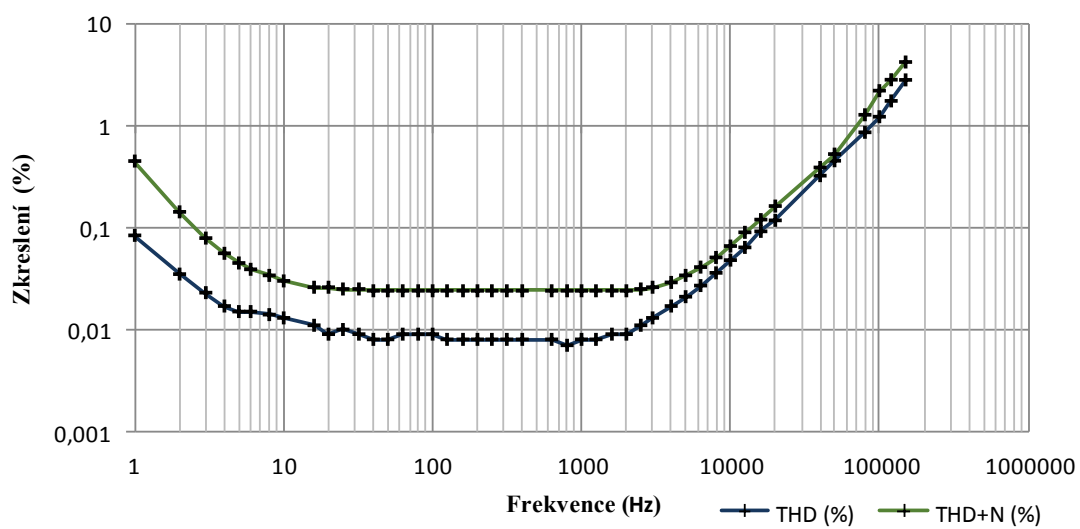
15.1.2 Naměřené výsledky pro DAP 1500



Obr. 54 – Modulová charakteristika DAP 1500



Obr. 55 – Fázová charakteristika DAP 1500



Obr. 56 – Průběh THD a THD+N - DAP 1500

15.2 Výsledky pro DAC převodníky a DAQ karty NI

Tab. 8 – Výsledky DAC převodníků a AO karet pro srovnání

Měřené parametry	Axagon HQ	FiiO X3	Dragon Fly 1.5	PC integr.	myDAQ	NI PCI 6035E*
Výstupní efektivní napětí (V)	1,183	1,486	1,175	1,864	7,069	7,068
Minimální ef. frekvence (Hz)	10	1	1	1	DC	DC
Maximální ef. frekvence (Hz)	20000	50000	40000	20000	50000	4000
THD pro 1 kHz (%)	0,016	0,002	0,025	0,002	0,012	0,013
THD+N pro 1 kHz (%)	0,033	0,017	0,078	0,259	0,422	1,688
Doba náběhu (us)	10,578	8,111	14,773	11,915	3,914	2,281
Rychlost přeběhu (V/us)	0,315	0,454	0,113	0,299	5,082	8,789

*Pozn.: Výsledky v tabulce jsou udávány pro signál 1 kHz, až na výjimku u karty NI PCI 6035E. Pro tuto kartu jsou výsledky uvedeny pro signál sinus o frekvenci 100 Hz, jelikož tato karta pracuje do maximální frekvence 10 kHz a generování 1 kHz signálu se blíží mezní hodnotám.

15.2.1 Porovnání DAC převodníků mezi sebou

Jak je z Tab. 6 vidět, výstupní napětí převodníků je podobné, všechny převodníky dodají výstupní napětí vyšší než 1 V. Měření výstupního napětí u integrované karty PC je silně ovlivněno vysokou úrovní DC složky na výstupu. Obě karty NI pak dodají napětí přes 7 V efektivních, což odpovídá rozsahu ± 10 V maximální.

Všechny převodníky pracují od 1 Hz, až na Axagon HQ, který pracuje až od 10 Hz. Obě karty NI samozřejmě generují i stejnosměrný signál. Průběhy jsou dostupné na Obr. 57.

Maximální efektivní frekvence se již různí, a je dána především vzorkovací frekvencí, na které převodník pracuje. Axagon HQ a integrovaná karta PC pracují do 20 kHz, DragonFly jde dál, až do 40 kHz a nejvyšší frekvenci je schopen generovat FiiO X3 (50 kHz). Nejvyšší efektivní frekvence myDAQ je 50 kHz a NI PCI 6035 pracuje do 4 kHz.

Hodnota harmonického zkreslení THD byla u FiiO X3 a integrované karty PC zaznamenána velice nízká (0,002 %). U ostatních zařízení nabývá tato veličina téměř o řád vyšších hodnot, nejvíce u DragonFly 1.5 (0,025 %).

Harmonické zkreslení plus šum má trochu jiné výsledky. Nejnižší hodnotu THD+N má FiiO X3 (0,017 %) a integrovaná karta PC má vysoký výsledek THD+N (0,26 %). NI karty s AO výstupem jsou v tomto ohledu několikanásobně horší - myDAQ (0,442 %) a NI PCI 6035E velice špatný výsledek (1,69 %). Vysoká hodnota THD+N u karty NI PCI 6035E je pravděpodobně dána starší technologií výroby této DAQ karty.

Nejvyšší rychlost přeběhu má FiiO X3 – 0,45 V/us (tento dobrý výsledek je dán vyšší vzorkovací frekvencí 192 kHz). Nejnižší rychlost přeběhu má DragonFly – jen 0,11 V/us). Co se týče karet NI, myDAQ má rychlost přeběhu 5,1 V/us a NI PCI 6035E 8,8 V/us.

Hodnota SNR nebyla měřena, neboť dostupnému HW není možné dojít k přesným výsledkům.

15.2.1 Porovnání DAC převodníků a karet NI s katalogovými údaji

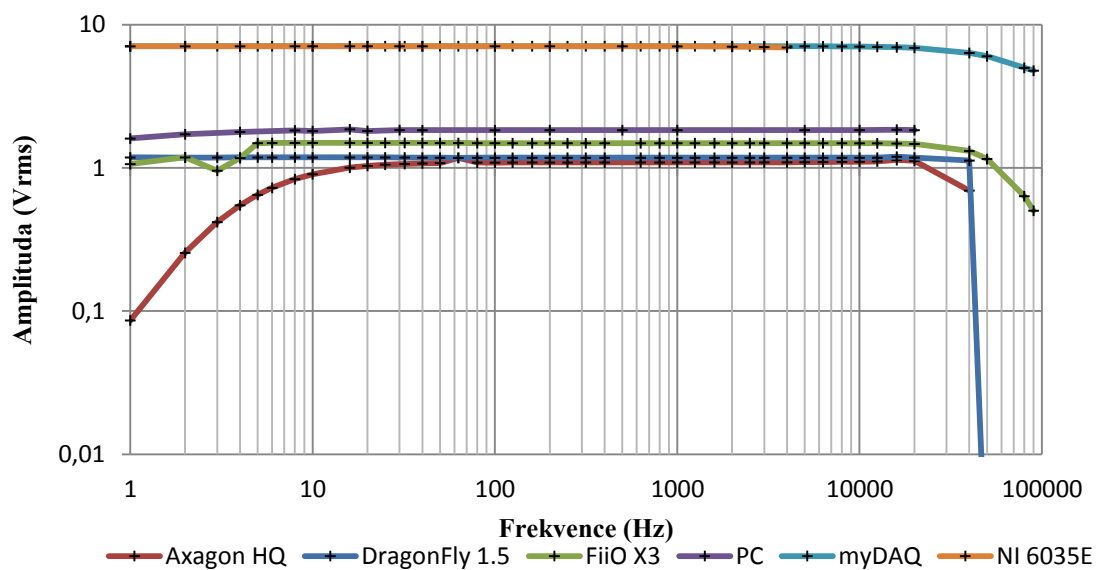
Výstupní napětí DAC převodníků Axagon HQ a DragonFly 1.5 je mírně nižší, než uvádí výrobce (o 2 %), ale rozdíl výsledků je malý. DAC převodník FiiO X3 v2 dokázal na výstupu vygenerovat napětí dokonce vyšší, než uvádí výrobce (1,48 V namísto 1,24 V). DAQ karty s analogovým výstupem generují stejně velké napětí, jako uvádí výrobce.

Frekvenční rozsah všech DAC převodníků je uváděn od 20 Hz do 20 kHz a všechny převodníky tento parametr splňují.

Poslední vlastností, která se dá u DAC převodníků porovnat je harmonické zkreslení plus šum: oba převodníky (FiiO X3 v2 a Axagon HQ) při měření prokázaly, že tento parametr mají přibližně 5 krát překročen.

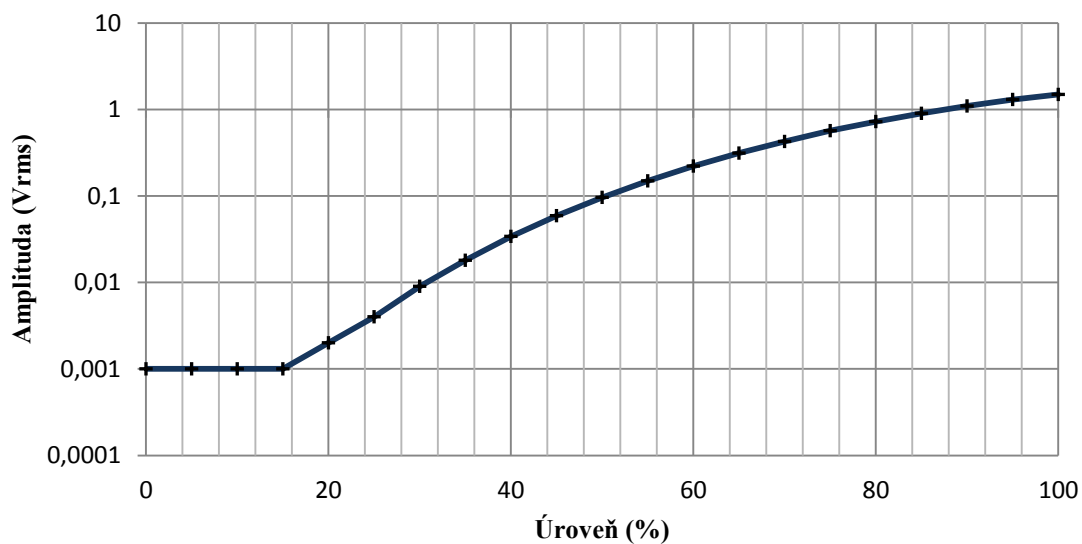
Všechny měřené výsledky jsou uvedeny v elektronických přílohách.

15.2.2 Naměřené výsledky pro DAC převodníky a karty NI s AO výstupy

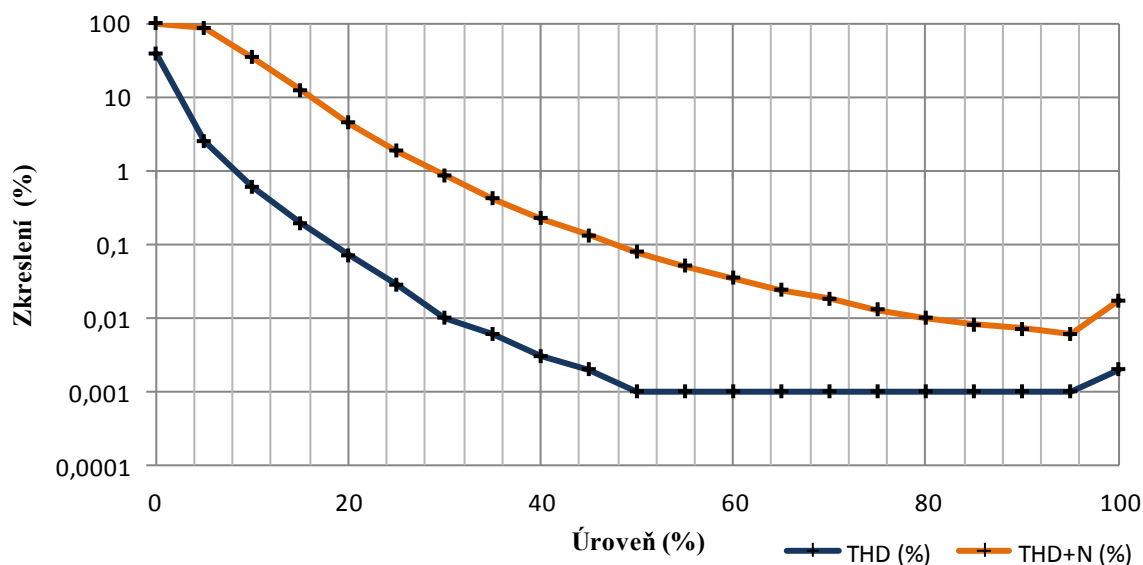


Obr. 57 – Srovnání amplitudových charakteristik DAC převodníků a karet NI s AO výstupy

Kromě klasických amplitudově frekvenčních charakteristik byly měřeny i průběhy amplitud a zkreslení v závislosti na procentuální úrovni výstupní amplitudy. Jelikož byly výsledky většinou velice podobné, budou zde uvedeny pouze průběhy pro FiiO X3 v2. Výjimkou je průběh u integrované karty PC, kde je výsledek ovlivněn vysokou hodnotou DC složky.



Obr. 58 – Průběh výstupního napětí na % úrovni - FiiO X3



Obr. 59 – Průběh zkreslení na % úrovni - FiiO X3

Z Obr. 58 je vidět, že průběh napětí na procentech výstupní úrovně má spíše logaritmický průběh (dá se očekávat, vzhledem k vlastnostem lidského ucha). Vždy do nějaké procentní úrovně je výstup silně ovlivněn šumem, a většinou okolo 30 % je zaznamenán růst výstupní amplitudy. U FiiO X3 je tento nárůst patrný již od 20 %.

Graf průběhu zkreslení na Obr. 59 dokazuje, že při regulaci hlasitosti dochází ke ztrátě kvality. Toto chování je nejspíš způsobeno faktem, že při nižších amplitudách se využívá menší počet bitů na výstupu převodníku. Hodnota THD je pod úrovní 1 % přibližně u 10 % výstupní úrovně, ale THD+N je pod 1 % až u přibližně 30 % výstupní úrovně.

Programovací prostředí LabVIEW obsahuje funkce pro ovládání hlasitosti výstupního audio zařízení (Sound Output Set Volume VI). Toto nastavení však není totožné s nastavením hlasitosti ve Windows (alespoň na použitém Windows 8.1 Enterprise a LabVIEW 2014). Kvůli tomu není možné využívat např. u DragonFly 1.5 vnitřního analogového nastavování výstupní úrovně a tím zlepšení kvality výstupního signálu pro nízké amplitudy.

Bylo ověřeno, že pokud se ručně nastaví úroveň hlasitosti ve Windows na nižší úroveň, všechny měřené DAC převodníky generují výstupní signál s mnohem nižším zkreslením, než když jsou ovládány prostřednictvím funkcí z LabVIEW. Za těchto podmínek bylo ověřeno vnitřní analogové ovládání výstupní úrovně převodníku DragonFly 1.5, kdy tento DAC převodník generuje při nízkých úrovních výstupního signálu (20 % výstupní úrovně) průběh zkreslený téměř stejnou vysokou úrovní THD a THD+N, jako při plné úrovni výstupního signálu. Tento způsob ovládání však není prostřednictvím LabVIEW automatizovatelný a pro účely generování signálů tudíž není použitelný.

Průběh harmonického zkreslení u myDAQ byl takový, že při výstupním napětí 1 – 4 Hz byla míra zkreslení obrovská ($\text{THD} > 10 \%$, $\text{THD+N} 100 \%$), v rozmezí 6 – 100 Hz klesala do hodnot 0,1 % THD i THD+N a pak byla konstantní až do frekvence 10 kHz, kdy zase začala míra zkreslení růst.

Co se týče schopností DAC převodníků generovat stejnosměrný signál jsou výsledky takové, že převodníky Axagon HQ a DragonFly 1.5 na výstupu nevygenerují žádné napětí, a převodníky FiiO X3 v2 a integrovaná karta v PC na výstupu poskytnou maximální napětí, které velmi rychle klesá (do 1 sekundy je napětí utlumeno na nulu). Karty NI s AO výstupy samozřejmě DC signál generují bez problémů.

16 Možnosti generování výkonových zkušebních signálů



Obr. 60 – Blokové schéma řetězce pro generování výkonových zkušebních signálů

Generování výkonových testovacích signálů prostřednictvím řetězce DAC převodník (ovládaný z LabVIEW) a následné zesílení signálu výkonový zesilovačem bezpochyby je možné. Právě díky měření parametrů zařízení obou kategorií je nyní možné přesně stanovit, za jakých okolností a s jakou kvalitou můžeme výstupní signál očekávat.

Prvním předpokladem je, že DAC převodník je schopen výkonový zesilovač budit dostatečně vysokou amplitudou signálu. Většina převodníků je schopna na výstupu podat napětí o něco málo nižší, než které by bylo potřebné pro plné vybuzení koncových stupňů (kromě AE Techron 7724). Vzhledem k tomu, že je nejvhodnější provozovat výkonové zesilovače při nižších napětích, než je vybuzení do limitace výstupního signálu, je buzení DAC převodníky dostatečné. Výjimkou je zesilovač AE Techron 7224, který potřebuje k plnému vybuzení až 7 V efektivních. Toto napětí nejsou měřené DAC převodníky schopny podat, buzení tohoto koncového stupně je tedy možné jedině pomocí AO karet NI, jež generují napětí až 7 V efektivních.

Co se týče rozsahu frekvencí, ve kterých je možné zkušební signály generovat, jsou vhodné tyto kombinace zařízení: Axagon HQ spolu s DAP 1500 a pak zbývající DAC převodníky s oběma zesilovači. Harman Kardon 1.3 i AE Techron pracují do frekvencí vyšších než 200 kHz, ale nejrychlejší DAC převodník nebo karta NI jsou schopny generovat signály maximálně do 50 kHz. V oblasti generování signálu do vysokých frekvencí jsou tedy omezujícím prvkem DAC převodníky. Pokud má však být cílem generování signálu v síti (50 Hz a vyšší harmonické frekvence), jsou všechny DAC převodníky a výkonové zesilovače dostatečné.

Míra zkreslení THD a THD+N se u jednotlivých DAC převodníků liší téměř až o řád, u koncových stupňů jsou rozdíly menší. Při požadavku na nízké harmonické zkreslení jsou vhodné všechny DAC převodníky vyjma Axagon HQ a DragonFly.

Pro generování velmi rychlých změn je klíčovým parametrem rychlost přeběhu. Pro DAC převodníky rychlost přeběhu mnohonásobně nižší, než u výkonových koncových stupňů, jelikož DAC převodníky na výstupu poskytují mnohem nižší napětí. Průkaznějším parametrem pro srovnání je doba náběhu mezi 10 – 90 %, ta se převodníků pohybuje okolo 10 us, u NI karet okolo 3 us. Výkonový zesilovač DAP 1500 je srovnatelně rychlý s DAC převodníky, AE Techron má dobu náběhu kratší než 5 us. Velmi rychlým zesilovačem je Harman Kardon 1.3, který má dobu náběhu kratší než 0,7 us. Pro velice rychlé změny je vhodné budit AE Techron 7224 nebo Harman Kardon 1.3 kartami NI, jinak můžou být použity libovolné DAC převodníky se všemi výkonovými zesilovači.

Při skokových změnách amplitudy generovaného signálu se mírně vyšším kolísáním střední hodnoty prokázal DAP 1500, nejvíce při 500 Hz. Ostatní výkonové zesilovače vlastností trpěly méně.

Co se týče maximálních frekvencí, které jsou DAC převodníky a DAQ karty s analogovými výstupy schopny generovat, jedná se o generování čistého sinusového signálu. Pro potřeby generování zkušebních signálů pro energetiku je běžnou frekvencí signálu 50 Hz. Na tento signál se dle potřeby superponují vyšší harmonické s různou úrovní amplitudy.

Převodník Axagon HQ je schopen generovat sinusový signál do maximální frekvence 20 kHz. Většina analyzátorů napětí zaznamenává průběh signálu do 50. harmonické frekvence. Pro signál síťové frekvence 50 Hz ovlivněný až 50. harmonickou je minimální teoretická vzorkovací frekvence 2,5 kHz. Převodník Axagon HQ je tedy schopen takový signál rekonstruovat 8 vzorky na periodu.

Pokud vezmeme v úvahu nejrychlejší měřený DAC převodník FiiO X3 v2, který generuje sinusový signál do 50 kHz, je možné rekonstruovat 50 Hz signál s 50 vyšší harmonickou frekvencí až 20 vzorky na periodu. Jinou možností je generování 50 Hz signálu ovlivněnou 100 vyšší harmonickou frekvencí, a to 10 vzorky na periodu.

17 Závěr

Při zpracování této práce byly splněny všechny body zadání. Podstatné množství času zabralo zpracování měřicích postupů z normy ČSN EN 60268-3 ed. 2 a vhodná úprava pro následnou automatizaci testů prostředky virtuální instrumentace. Samotné programování aplikací v prostředí LabVIEW už bylo jen přenesení nabytých postupů do strojového jazyka a následné odladění testovací aplikace.

Během práce byly vytvořeny měřicí aplikace v prostředí LabVIEW pro testování parametrů DAC převodníků a výkonových zesilovačů, potřebných pro ověření možností generování výkonových zkušebních signálů. Vytvořené testovací aplikace jsou použitelné pro testování všech DAC převodníků, jež jsou kompatibilní s operačním systémem Windows. Testovací aplikace výkonových zesilovačů jsou rovněž vhodné pro měření vlastností libovolných koncových stupňů, ať už průmyslových zesilovačů nebo těch, které jsou používány v oblasti audio.

Současná aplikace je vázána na použitý hardware, při měření má uživatel možnost volit z několika měřicích karet NI. Drobnou úpravou lze do testeru doplnit podporu libovolných měřicích karet NI. Při dalším případném vývoji by bylo vhodné měřicí aplikace upravit na vyšší úroveň automatizace testování tak, aby měření všech parametrů probíhalo na stisknutí jednoho tlačítka.

Seznam použité literatury

- [1] Bílý šum. *Učebnice teorie rádiové komunikace* [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-01-10].
Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTRK/?Komunika%E8n%ED_sign%E1ly:Vyj%E1d%F8en%ED_n%E1hodn%FDch_proces%F9:B%EDl%FD_%B9um
- [2] White Noise Definition Vs. Pink Noise. *Acoustic Fields* [online]. North Hollywood, USA: Dennis Foley, 2014 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.acousticfields.com/white-noise-definition-vs-pink-noise/>
- [3] Square Wave. Wolfram MathWorld [online]. Wolfram Research, 2016 [cit. 2017-01-10].
Dostupné z: <http://mathworld.wolfram.com/SquareWave.html>
- [4] Co to je převodník a jak to funguje. Puresound [online]. Brno [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://puresound.cz/content/6-co-to-je-prevodnik>
- [5] MACHÁČEK, Zdeněk a Pavel NEVŘIVA. *Modulované signály*. VŠB-TU Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2600-4.
- [6] E107. *4hv* [online]. [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://4hv.org/print.php?plugin:forum.167393>
- [7] VRBA, CSC., Prof. Ing. Radimír a Doc. Ing. Jiří HÁZE, PH.D. Teorie vzájemného převodu analogového a číslicového signálu [online]. Brno: VUT-Brno, 2010 [cit. 2017-01-10].
- [8] Vykonove_zesilovace. Dlabos [online]. ČR [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://dlabos.wz.cz>
- [9] FiiO X3 (2nd Gen) Portable High Resolution Audio Player (Titanium). *Bhphotovideo* [online]. 2014 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: https://www.bhphotovideo.com/c/product/1137456-REG/fiio_x3_ii_x3_portable_hi_res_music.html
- [10] DragonFly Series: USB DAC + Preamp + Headphone Amp. Audioquest [online]. Frisco, USA: The Quest Group, 2016 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.audioquest.com/dragonfly-series/>
- [11] AudioQuest DragonFly Black - USB DAC + Preamp + Headphone Amp. Bhphotovideo [online]. 2016 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: https://www.bhphotovideo.com/c/product/1244851-REG/audioquest_dragonflyblk_dragonfly_black_usb.html
- [12] AXAGON ADA-HP. Alza.cz [online]. 2016 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/axago-ada-hp-d2412611.htm?o=2>
- [13] AXAGON USB2.0 - HQ audio 96kHz S/PDIF+sl. zes. AT Computers [online]. 2016 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <https://www.atcomp.cz/zbozi/axagon-usb2-0-hq-audio-96khz-s-pdif-sl-zes-/detail.aspx?p=z:391069>
- [14] Harman/kardon Signature 1.3. Hifi-wiki.de [online]. 2015 [cit. 2017-01-11]. Dostupné z: http://www.hifi-wiki.de/index.php/Harman/kardon_Signature_1.3
- [15] AE TECHRON: 7224 DC-ENABLED AC POWER AMPLIFIER. Aetechron [online]. Elkhart, USA: AE Techron, 2016 [cit. 2017-01-11]. Dostupné z: <http://www.aetechron.com/IND-RESEARCH-7224.shtml>

- [16] DAP 1500 [online]. Karviná: DEXON CZECH [cit. 2017-02-20]. Dostupné z:
<http://data.dexon.cz/dap+.pdf>
- [17] CMC 256plus. Omicronenergy [online]. Vienna, Austria: OMICRON electronics, 2013 [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <https://www.omicronenergy.com/en/products/all/secondary-testing-calibration/cmc-256plus/>
- [18] Elektroakustická zařízení - Část 3: Zesilovače. Ed. 2. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [19] BILÍK, PH.D., doc. Ing. Petr. Virtuální instrumentace 2 [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012, s. 9 [cit. 2017-03-06].
- [20] Lineární režim nf zesilovačů. Elnika [online]. Česká Republika, 2004 [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: http://elnika.sweb.cz/mereni/linear_rezim.htm
- [21] Šumové vlastnosti zesilovačů. Zesilovače [online]. Ostrava: Josef Sedlák, 2002 [cit. 2017-01-16]. Dostupné z: <http://www.zesilovace.cz/view.php?cisloclanku=2002122402>
- [22] Teorie zesilovačů - část 1.: Zewel [online]. Česká Republika: Zdeněk Tulis, 2004 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: http://www.zewel.tuliscz.com/dpa_t1.php#vykon
- [23] Absolute Accuracy of DAQ Devices. Digital.ni [online]. Austin, USA: NI, 2005 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z:
<http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/BA704FDCBB6C9C4E86256FAC006DB66B>
- [24] Přístrojový driver ke generátoru Agilent:
http://sine.ni.com/apps/utf8/niid_web_display.download_page?p_id_guid=9AAF830ED6FD1947E04400144FB7D21D

Seznam příloh

Příloha 1: Jmenovité podmínky měření výkonových zesilovačů dle ČSN EN 60268-3 ed. 2	I
---	---

Obsah přiloženého CD

- \Vysledky_mereni\DAC_a_karty
Obsahuje výsledky měření DAC převodníků a DAQ karet ve formě tabulek
- \Vysledky_mereni\Vykonove_zesilovace
Obsahuje výsledky měření výkonových zesilovačů ve formě tabulek
- \Merici_aplikace_LabVIEW\agilent_3352x_series.zip
Přístrojový driver pro ovládání generátoru Agilent z LabVIEW
- \Merici_aplikace_LabVIEW\DAC_prevedniky
Obsahuje aplikace pro měření DAC převodníků
- \Merici_aplikace_LabVIEW\DAQ_karty_NI
Obsahuje aplikace pro měření DAQ karet NI
- \Merici_aplikace_LabVIEW\Vykonove_zesilovace
Obsahuje aplikace pro měření výkonových zesilovačů

18 Příloha 1 – Jmenovité podmínky měření výkonových zesilovačů dle ČSN EN 60268-3 ed. 2

ČSN EN 60268-3 ed. 2 se v kapitolách 3 až 13 zabývá podmínkami měření zesilovačů, které platí vždy, pokud není vysloveně uvedeno jinak.

- Je nutné zajistit, aby byl zesilovač napájen (síťovým) zdrojem k tomu určeným.
- Podmínky prostředí předpokládají výrobcem určené klimatické podmínky. Většinou se jedná o 20 °C a maximální úroveň vzdušné vlhkosti.
- Výstupní svorky zesilovače musí být připojeny na zátěž o správné impedanci – obvykle 4 nebo 8 Ω .
- Nevyužívané výstupní svorky musí být odpojeny nebo jinak zakončeny, pokud tak uvádí výrobce.
- Základním testovacím signálem je čistý sinusový signál o frekvenci 1 kHz, pokud měření nepožaduje jiné nastavení. Amplituda signálu vychází z hodnoty pro lineární režim.
- Pokud zesilovač obsahuje prvek pro ovládání hlasitosti, musí být nastaven do takové polohy, aby bylo na výstupních svorkách dosaženo maximálního napětí, snížené o -10 dB (přibližně 1/3). V praxi bude regulátor hlasitosti nastaven do maximální polohy, a bude se upravovat napětí generátoru.
- Pokud zesilovač obsahuje korekční členy (ovládání tónu), mají být tyto členy vyřazeny nebo naladěny tak, aby co nejméně ovlivňovaly vstupní signál.
- Pokud zesilovač obsahuje prvek pro balancování výstupu, má být nastaven na centrální pozici.
- Lineární režim – problematika bude dále rozebrána, ale ve zkratce se jedná o úroveň vstupního signálu, který odpovídá přibližně 33 % maximálního výstupního napětí. V tomto pracovním rozmezí není zesilovač přetížen a očekávají se i dobré výsledky měření.
- Pokud jsou k dispozici informace o provozních podmínkách zesilovače, mají tyto hodnoty přednost nad univerzálními podmínkami, uvedenými v normě.
- Pokud zesilovač obsahuje automatické funkce, jako například limity, kompresory zvuku nebo jiné útlumové prvky, mají být během měření vyřazeny, pokud to je možné. Výjimkou je situace, kdy se měří vlastnosti právě těchto prvků.
- Pokud je požadováno měření pro různá nastavení ovladače hlasitosti, měly by být zahrnuty tyto stavy: lineární režim, maximální hlasitost a dále pak hodnoty -3 dB, -6 dB, -10 dB, -20 dB a -40dB oproti vstupnímu signálu.
- Ovládací prvky pro hlasitost pro další kanály, které zrovna nejsou měřeny, by měly být nastaveny do minimální polohy.
- Před samotným měřením by se zesilovač měl nechat zahřát. Jedná se o provoz zesilovače v podmínkách podobných provozním po dobu alespoň jedné hodiny.

- Pokud se na zesilovači bude provádět série měření, doporučuje se mezi měřeními nechat zesilovač odpočinout. Tento postup je důležitý zejména při namáhavých testech, jako je např. měření maximálního trvalého dodávaného výkonu.
- Během měření, by měl být zesilovač uchycen nebo uložen podobným způsobem, jak bude standardně užíván.